



**Filipe Lopes Rodrigues**

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

## **Análise da influência dos níveis de isolamento térmico no conforto térmico e no desempenho energético dos edifícios residenciais**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil-Perfil de construção

Orientador: Doutor Daniel Aelenei,  
Professor Auxiliar, FCT/UNL

Co-orientador: Doutor Fernando M. A. Henriques,  
Professor Catedrático, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Professor Doutor João C. G Rocha de Almeida

Arguente: Professor Doutor António Heleno Moret Rodrigues

Vogal: Professor Doutor Daniel Aelenei



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Dezembro, 2017**



Copyright” Filipe Lopes Rodrigues, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **Agradecimentos**

Agradeço a todos aqueles, quer por um ou outro motivo, me possibilitaram a realização deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Daniel Aelenei, por todo o tempo que despendeu para que este trabalho se realizasse e por todas as suas sábias opiniões. Ao meu co-orientador, Professor Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques, pela sua disponibilidade.

Aos meus grandes amigos por todos os momentos de descontração que me proporcionaram.

À minha família, especialmente mãe, pai, irmão e avô por toda a paciência e apoio moral que me deram nesta fase.



## Resumo

O impacto ambiental proporcionado pelos consumos energéticos excessivos à custa de fontes de energia não renovável está na base da criação de legislação que obriga a diminuição dos consumos de energia em edifícios. Surge em 1990 o Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios RCCTE, a primeira base regulamentar em Portugal relativa às condições térmicas dos edifícios, com o objectivo generalizado de assegurar o conforto térmico das edificações, sem acréscimo do consumo energético.

As alterações introduzidas pelas revisões regulamentares desde a entrada em vigor do primeiro regulamento em 1990, consistem em alterações sucessivas da qualidade térmica mínima dos parâmetros que regem o comportamento térmico e os consumos de energia dos edifícios, como o coeficiente de transmissão térmica da envolvente, trazendo o aumento da resistência térmica dos edifícios.

Este trabalho tem como objectivo analisar o impacto causado por estas alterações no conforto térmico e no desempenho energético dos edifícios residenciais. Para alcançar o objectivo proposto, o trabalho recorre a uma metodologia que consiste em simulações das soluções construtivas características de cada época regulamentar. As simulações são feitas com o recurso à utilização da folha de cálculo proposta pelos regulamentos e através do programa *EnergyPlus*. Assim, com os resultados obtidos foi possível demonstrar que o aumento da resistência térmica da envolvente dos edifícios é responsável por um melhor comportamento térmico de edifícios no período de aquecimento, mas pode provocar problemas de sobreaquecimento no período de arrefecimento.

**Palavras-Chave:** Conforto térmico adaptativo, Necessidades de energia, *EnergyPlus*, Regulamentação térmica.





## Abstract

The environmental impact brought up by the excessive energy consumption, derived from non-renewable energy resources, forms the basis for the creation of the legislation aiming at a reduction in energy consumption in buildings. In 1990, emerges the Regulation on the Characteristics of Thermal Behavior of Buildings RCCTE, the first regulatory code in Portugal, concerning the buildings' thermal conditions, with the main goal of ensuring the thermal comfort of buildings, without an increment on the energy consumption.

The modifications introduced by the regulatory revisions, since the implementation of the first regulations in 1990, consist of successive changes in the minimum thermal quality of the parameters governing the thermal behavior and the energy consumption of buildings, such as the coefficient of thermal conductivity of the enclosure, leading to an increase of thermal resistance of buildings.

This work intends to analyze the impact caused by these changes on thermal comfort and energy performance of residential buildings. Consequently, to achieve the suggested goal, the work uses a methodology that consists of simulations of the constructive solutions characteristic of each regulatory epoch. The simulations are made using the spreadsheet proposed by the regulations and through the *EnergyPlus* program. Therefore, with the results obtained, it was possible to demonstrate that the increase of the thermal resistance of the building is responsible for their better thermal behavior during the heating period, but may cause problems of overheating in the cooling period.

**Key-words:** Adaptive Thermal Comfort, Energy needs, *EnergyPlus*, Thermal Regulation.



# Índice

Resumo .....	I
Abstract .....	III
Lista de abreviaturas siglas e símbolos .....	XIII
1.Introdução.....	1
1.1 Motivação e enquadramento .....	1
1.2 Objectivo e metodologia .....	2
1.3 Estrutura do trabalho .....	3
2.Comportamento térmico dos edifícios.....	5
2.1 Evolução dos regulamentos .....	5
2.2 Zonamento climático.....	7
2.3 Evolução das envolventes dos edifícios .....	8
2.4 Simulação do comportamento térmico .....	14
2.5 Conforto térmico .....	15
2.5.1 Considerações gerais .....	15
2.5.2 Frequência acumulada.....	15
2.5.3 Modelo adaptativo.....	15
2.5.3.1 Modelo de conforto adaptativo ASHRAE 55 .....	16
2.5.3.2 Modelo de conforto adaptativo LNEC .....	17
2.5.3.3 Modelo de conforto adaptativo EN 15251 .....	18
3.Metodologia de trabalho .....	21
3.1 Descrição do edifício .....	21
3.1.1 Arquitectura do edifício .....	21
3.1.2 Elementos de sombreamento .....	22
3.1.3 Soluções construtivas .....	25
3.2 Caracterização climática.....	30
3.2.1.1 Bragança .....	30
3.2.1.2 Coimbra .....	30
3.2.1.3 Lisboa .....	31
3.3 Metodologia utilizada para obtenção de resultados .....	31
3.4 <i>Energy plus</i> .....	32
3.4.1 Descrição Geral .....	32
3.4.2 Validação do modelo de simulação dinâmica.....	33
3.4.3 Descrição do modelo utilizado na simulação dinâmica .....	35
3.4.3.1 Algoritmos de cálculo .....	36
3.4.3.2 Geometria do edifício .....	38
3.4.3.3 Soluções construtivas .....	39
3.4.3.4 Elementos de sombreamento exterior fixos .....	40
3.4.3.5 Proteção solar móvel.....	41
3.4.3.6 Ganhos térmicos internos .....	42
3.4.3.7 Ventilação natural.....	42

3.4.3.8 Controlo da temperatura interior .....	42
3.4.4 Ficheiros climáticos.....	42
3.4.5 Resultados pretendidos .....	43
4.Análise de resultados .....	45
4.1 Apresentação das necessidades energéticas .....	45
4.2 Apresentação de resultados de frequência acumulada .....	49
4.2.1 Período de Inverno- Frequência acumulada .....	50
4.2.2 Período de Verão- Frequência acumulada .....	52
4.3 Modelo adaptativo EN 15251 .....	54
4.3.1Período de Inverno- Modelo adaptativo.....	54
4.3.2 Período de Verão- Modelo adaptativo .....	60
5.Conclusões.....	67
6.Referências bibliográficas .....	69

## Índice de tabelas

Tabela 2.1- Critérios para a determinação da zona climática de Inverno.....	8
Tabela 2.2- Critérios para a determinação da zona climática de Verão .....	8
Tabela 2.3- Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos, RCCTE 1990.....	9
Tabela 2.4- Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência de elementos opacos e de vãos envidraçados, RCCTE 1990. ....	9
Tabela 2.5- Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência de elementos opacos e de vãos envidraçados, RCCTE 2006. ....	10
Tabela 2.6- Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos, REH 2013.....	11
Tabela 2.7- Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência de elementos opacos e de vãos envidraçados, REH 2013. ....	11
Tabela 2.8- Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos e de vãos envidraçados, REH 2016. ....	12
Tabela 2.9- Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência de elementos opacos e de vãos envidraçados, REH 2016. ....	12
Tabela 2.10- Tipo de parede por período de construção.....	13
Tabela 2.11- Tipo de laje por período de construção .....	13
Tabela 2.12- Tipo de janela por período de construção. ....	13
Tabela 2.13- Descrição das categorias de conforto, EN 15251. ....	20
Tabela 3.1- Áreas dos elementos opacos, vãos envidraçados em m <sup>2</sup> e percentagem de envidraçados. ....	22
Tabela 3.2- Áreas dos elementos das fachadas, pavimentos e percentagem de vãos envidraçados em relação ao pavimento. ....	22
Tabela 3.3- Medidas das palas de sombreamento. ....	24
Tabela 3.4- Características físicas e geométricas dos materiais constituintes das soluções construtivas adoptadas, RCCTE1990.....	26
Tabela 3.5- Características físicas e geométricas dos materiais constituintes das soluções construtivas adoptadas, RCCTE 2006.....	27
Tabela 3.6- Características físicas e geométricas dos materiais constituintes das soluções construtivas adoptadas, REH 2013.....	28
Tabela 3.7- Características físicas e geométricas dos materiais constituintes das soluções construtivas adoptadas, REH 2016.....	29
Tabela 3.8- Valor de referência e declives para ajustes em altitude para a estação de aquecimento, Bragança. ....	30
Tabela 3.9- Valor de referência e declives para ajustes em altitude para a estação convencional de arrefecimento, Bragança.....	30

Tabela 3.10- Valor de referência e declives para ajustes em altitude para a estação de aquecimento, Coimbra. ....	30
Tabela 3.11- Valor de referência e declives para ajustes em altitude para a estação convencional de arrefecimento, Coimbra.....	31
Tabela 3.12- Valor de referência e declives para ajustes em altitude para a estação de aquecimento, Lisboa. ....	31
Tabela 3.13- Valor de referência e declives para ajustes em altitude para a estação convencional de arrefecimento, Lisboa.....	31
Tabela 3.14- Validação do modelo de simulação dinâmica, C600. ....	35
Tabela 3.15- Validação do modelo de simulação dinâmica, C610. ....	35
Tabela 3.16- Validação do modelo de simulação dinâmica, C900. ....	35
Tabela 3.17- Validação do modelo de simulação dinâmica, C910. ....	35
Tabela 3.18- Fração de tempo que os dispositivos móveis se encontram activados, <i>Fmv</i> .....	41
Tabela 4.1- Valores do coeficiente de transmissão térmica médio $U_m$ correspondente a cada período em estudo. ....	45
Tabela 4.2- Necessidades nominais anuais de energia útil, <i>EnergyPlus</i> . ....	45
Tabela 4.3- Necessidades nominais anuais de energia útil, REH. ....	46
Tabela 4.4- Graus-dia e temperatura média exterior de Bragança, Coimbra e Lisboa. ....	48

## Índice de figuras

Figura 1.1- Taxa de dependência energética de Portugal.....	1
Figura 1.2- Evolução do consumo de energia primária em Portugal.....	2
Figura 2.1- Zonamento climático em Portugal .....	7
Figura 2.2- Diagrama do funcionamento do <i>EnergyPlus</i> . ....	14
Figura 2.3- Valores recomendados da temperatura operativa de conforto em função da temperatura média mensal, ASHRAE 55.....	16
Figura 2.4- Valores de temperatura de conforto térmico, LNEC.....	18
Figura 2.5-Valores recomendados da temperatura operativa de conforto em função da temperatura média exterior ponderada, Verão, EN 15251. ....	19
Figura 2.6-Valores recomendados da temperatura operativa de conforto em função da temperatura média exterior ponderada, Inverno, EN 15251.....	19
Figura 3.1- Planta do projecto em estudo. ....	21
Figura 3.2- Dimensionamento da pala de sombreamento.....	23
Figura 3.3- Algoritmo de cálculo <i>EnergyPlus- Version</i> .....	36
Figura 3.4- Algoritmo de cálculo <i>EnergyPlus- Simulation control</i> . ....	36
Figura 3.5- Algoritmo de cálculo <i>EnergyPlus- Building</i> referente a Bragança e Coimbra. ....	36
Figura 3.6- Algoritmo de cálculo <i>EnergyPlus- Building</i> referente a Lisboa.....	37
Figura 3.7- Algoritmo de cálculo <i>EnergyPlus- Shadow Calculation</i> .....	37
Figura 3.8- Algoritmo de cálculo <i>EnergyPlus- Surface Convection Algorithm : Inside</i> . ....	37
Figura 3.9- Algoritmo de cálculo <i>EnergyPlus- Surface Convection Algorithm : Outside</i> . ....	37
Figura 3.10- Algoritmo de cálculo <i>EnergyPlus- Heat Balance Algorithm</i> .....	38
Figura 3.11- Algoritmo de cálculo <i>EnergyPlus- Zone Capacitance Multiplier: Research Specia</i> 38	
Figura 3.12- Algoritmo de cálculo <i>EnergyPlus- Time Step</i> . ....	38
Figura 3.13- Algoritmo de cálculo <i>EnergyPlus- Run period</i> . ....	38
Figura 3.14- Características da caixilharia utilizadas no <i>EnergyPlus</i> . ....	39
Figura 3.15- Características dos estores utilizadas no <i>EnergyPlus</i> .....	39
Figura 3.16- Características do vidro utilizadas no <i>EnergyPlus</i> . ....	40
Figura 3.17- Vista sudoeste da habitação estudada com a definição dos obstáculos. ....	40
Figura 3.18- Vista nordeste da habitação estudada com a definição dos obstáculos.....	41
Figura 3.19- Temperatura média mensal exterior de Bragança, Coimbra e Lisboa.....	43
Figura 4.1- Gráfico representativo das necessidades nominais anuais de energia útil para estações de aquecimento e arrefecimento, <i>EnergyPlus</i> .....	46

Figura 4.2- Gráfico representativo do somatório das necessidades nominais anuais de energia útil para estações de aquecimento e arrefecimento, <i>EnergyPlus</i> .....	47
Figura 4.3- Gráfico representativo das necessidades nominais anuais de energia útil para estações de aquecimento e arrefecimento, REH.....	48
Figura 4.4- Gráfico representativo do somatório das necessidades nominais anuais de energia útil para estação de aquecimento e arrefecimento, REH. ....	49
Figura 4.5- Gráfico de frequência acumulada Bragança, Inverno. ....	50
Figura 4.6- Gráfico de frequência acumulada Coimbra, Inverno. ....	51
Figura 4.7- Gráfico de frequência acumulada Lisboa, Inverno. ....	51
Figura 4.8- Gráfico de frequência acumulada Bragança, Verão.....	52
Figura 4.9- Gráfico de frequência acumulada Coimbra, Verão. ....	53
Figura 4.10- Gráfico de frequência acumulada Lisboa, Verão. ....	53
Figura 4.11- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Bragança- Inverno, $U_m=0,99 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . 54	
Figura 4.12- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Bragança- Inverno, $U_m=0,71 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . 55	
Figura 4.13- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Bragança- Inverno, $U_m=0,58 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . 55	
Figura 4.14- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Bragança- Inverno, $U_m=0,36 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . 56	
Figura 4.15- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Coimbra- Inverno, $U_m=0,99 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . .. 56	
Figura 4.16- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Coimbra- Inverno, $U_m=0,71 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . .. 57	
Figura 4.17- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Coimbra- Inverno, $U_m=0,58 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . .. 57	
Figura 4.18- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Coimbra- Inverno, $U_m=0,36 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . .. 58	
Figura 4.19- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Lisboa- Inverno, $U_m=0,99 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . ..... 58	
Figura 4.20- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Lisboa- Inverno, $U_m=0,71 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . ..... 59	
Figura 4.21- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Lisboa- Inverno, $U_m=0,58 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . ..... 59	
Figura 4.22- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Lisboa- Inverno, $U_m=0,36 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . ..... 60	
Figura 4.23- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Bragança- Verão, $U_m=0,99 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .... 60	
Figura 4.24- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Bragança- Verão, $U_m=0,71 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .... 61	
Figura 4.25- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Bragança- Verão, $U_m=0,58 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .... 61	
Figura 4.26- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Bragança- Verão, $U_m=0,36 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .... 62	
Figura 4.27- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Coimbra- Verão, $U_m=0,99 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ..... 62	
Figura 4.28- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Coimbra- Verão, $U_m=0,71 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ..... 63	
Figura 4.29- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Coimbra- Verão, $U_m=0,58 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ..... 63	
Figura 4.30- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Coimbra- Verão, $U_m=0,36 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ..... 64	
Figura 4.31- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Lisboa- Verão, $U_m=0,99 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ..... 64	
Figura 4.32- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Lisboa- Verão, $U_m=0,71 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ..... 65	



Figura 4.33- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Lisboa- Verão, $U_m=0,58 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .....	65
Figura 4.34- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Lisboa- Verão, $U_m=0,36 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .....	66



## Lista de abreviaturas siglas e símbolos

### Símbolos

$\theta_s$	Ângulo zenital (°)
$\Phi_p$	Azimute da parede (°)
$\Phi_s$	Azimute da Sol (°)
$\delta$	Declinação (°)
$T_e$	Temperatura exterior (°C)
$T_{n-i}$	Temperatura média exterior do dia (i) anterior (°C)
$T_{mp}$	Temperatura média exterior ponderada (°C)
$T_m$	Temperatura média mensal de conforto (°C)
$T_{oc}$	Temperatura operativa interior de conforto (°C)
a	Declive para ajustes em altitude (°C/m)
Cp	Calor específico a pressão constante (J/kg.K)
e	Espessura (m)
GD	graus-dia (°C.dia)
Ni	Valor máximo das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (kWh/m <sup>2</sup> .ano)
Nic	Necessidades de energia útil para aquecimento (kWh/m <sup>2</sup> .ano)
Nv	Valor máximo das necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento (kWh/m <sup>2</sup> .ano)
Nvc	Necessidades de energia útil para arrefecimento (kWh/m <sup>2</sup> .ano)
R	Resistência térmica (m <sup>2</sup> .°C/W)
Rt	Somatório das resistências térmicas da solução constructiva e resistências superficiais (m <sup>2</sup> .°C/W)
$\Sigma$	Somatório das necessidades nominais anuais de energia útil de aquecimento e arrefecimento (kWh/m <sup>2</sup> .ano)
Tconf	Temperatura de conforto (°C)
Ti	Temperatura interior (°C)
U	Coeficiente de transmissão térmica (W/m <sup>2</sup> .°C)

Um	Valor médio do coeficiente de transmissão térmica ( $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )
Umáx	Coeficiente de transmissão térmica máximo admissível ( $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )
Uref	Coeficiente de transmissão térmica de referência ( $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )
Uw	Coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados ( $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )
z	Cota (m)
$\theta_{\text{ext}}$	Temperatura exterior ( $^\circ\text{C}$ )
$\theta_{\text{ext},i}$	Temperatura exterior média ( $^\circ\text{C}$ )
$\lambda$	Condutibilidade térmica ( $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ )
$\lambda$	Latitude ( $^\circ$ )
$\rho$	Massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ )

### Abreviaturas e siglas

ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
BLAST	<i>Building Loads Analysis and System Thermodynamics</i>
btr	Coeficiente de redução de perdas
Cat	Categoria
CC	Zona térmica, Circulação comum
E	Este
EN	<i>European Norm</i>
EPS	Poliestireno expandido moldado
ETICS	<i>External Thermal Insulation Composite Systems</i>
FA	Zona térmica, Fracção autónoma
Fmv	Fracção de tempo em que os dispositivos móveis se encontram totalmente ativados na estação de arrefecimento
I	Zona climática, Inverno
ICB	Aglomerado de cortiça expandida
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
N	Norte

NE	Nordeste
NW	Noroeste
ptp	Ponte térmica plana
PVC	Cloreto de Polivinilo
RCCTE	Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios
RECS	Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviço
REH	Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização dos Edifícios
S	Sul
SCE	Sistema Nacional de Certificação Energética
SE	Sudeste
SW	Sudoeste
EU	União Europeia
V	Zona climática, Verão
W	Oeste
XPS	Poliestireno expandido extrudido
zc	Zona corrente



# 1. Introdução

## 1.1 Motivação e enquadramento

A preocupação com o consumo energético é hoje em dia um tema que está inerente à sociedade a uma escala global. A consciencialização da escassez de combustíveis fósseis endógenos (petróleo, carvão e gás natural), que asseguram a produção de energia necessária na maioria dos países desenvolvidos e o impacte ambiental que o consumo exagerado traz para o planeta, gerou a criação de órgãos mundiais com o âmbito de reverter a tendência do aumento do consumo [1] [2].

Portugal é um país com poucos recursos energéticos fósseis em que a produção de energias renováveis não satisfaz as suas necessidades energéticas. Consequentemente, apresenta uma taxa de dependência energética muito elevada quando comparada com a média calculada ao nível da UE. Todavia, como ilustra a Figura 1.1, essa taxa teve um decréscimo nos últimos anos, devido ao aumento da produção de energias renováveis e à diminuição de utilização de energia proveniente de recursos fósseis (Figura 1.2).

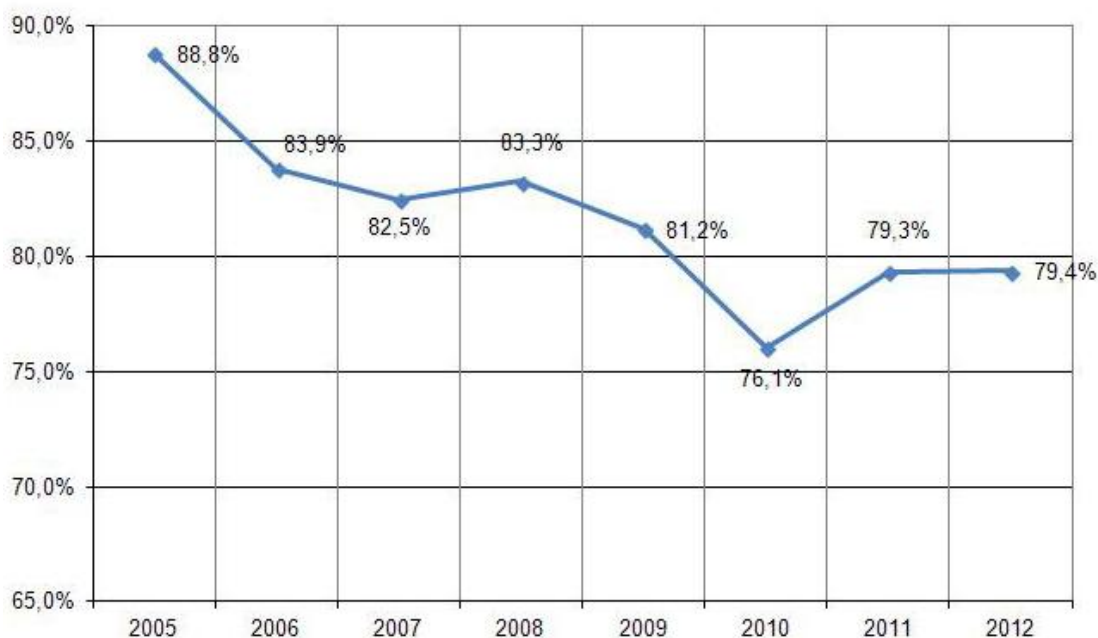


Figura 1.1- Taxa de dependência energética de Portugal (Fonte:[1])

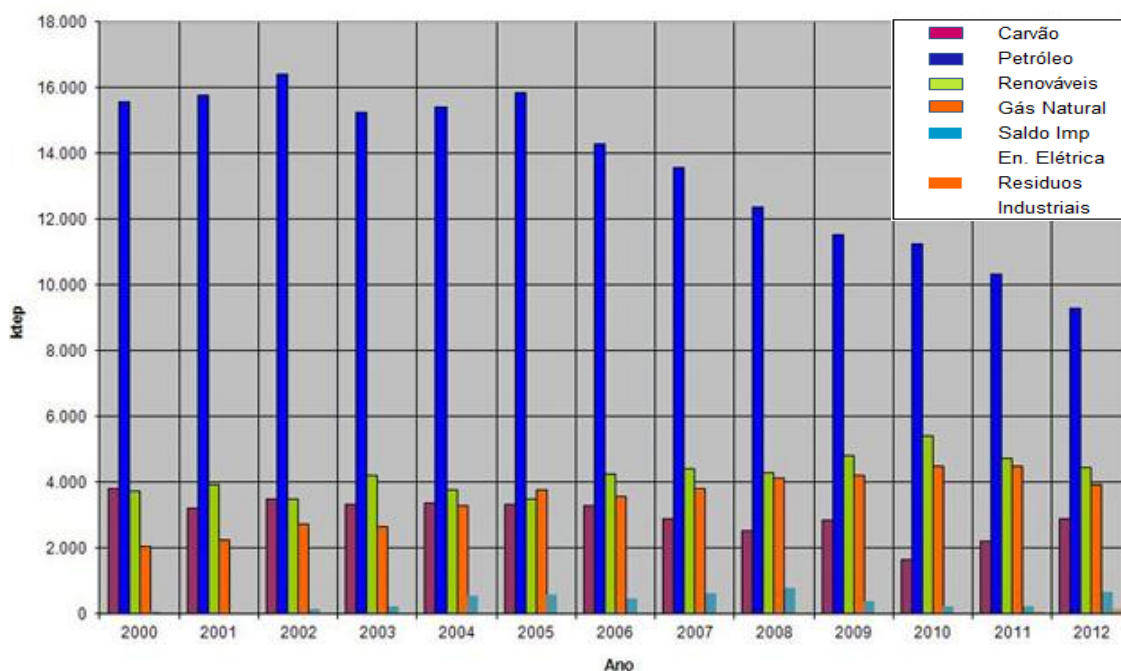


Figura 1.2- Evolução do consumo de energia primária em Portugal (Fonte: Adaptado[1])

O consumo energético dos edifícios representa na Europa 40% da sua totalidade e 30% em Portugal. É estimado que 50% deste consumo possa ser reduzido através de medidas de eficiência energética [1]. Tendo em conta os consumos energéticos elevados, os países Europeus implementaram estratégias na legislação para inverter esta tendência e como consequência aumentar a qualidade do conforto térmico dos utilizadores das habitações.

O Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), introduzido em 1990, [3] foi a primeira base regulamentar em Portugal relativa às condições térmicas mínimas dos novos edifícios para assegurar o conforto térmico dos ocupantes sem acréscimo do consumo energético. Desde então, a regulamentação térmica dos edifícios sofreu várias alterações procurando a introdução de melhorias através essencialmente do aumento da resistência térmica da envolvente, na base do pressuposto de que tal estratégia se traduziria num aumento das condições de conforto e da eficiência energética. A presente dissertação surge na sequência do interesse em estudar e analisar de forma crítica o impacto causado pelas alterações regulamentares nas necessidades energéticas e no conforto térmico dos habitantes.

## 1.2 Objectivo e metodologia

A implementação sucessiva de alterações ao nível regulamentar dos parâmetros que regem o comportamento térmico e consumos de energia dos edifícios, como seja o coeficiente de transmissão térmica da envolvente, exige uma análise aprofundada do conforto térmico e das necessidades energéticas proporcionados pelos requisitos regulamentares cada vez mais exigentes.

Este trabalho tem como objectivo estudar a influência dos níveis de isolamento térmico no conforto térmico e nas necessidades energéticas dos edifícios residenciais, atendendo às alterações introduzidas pelas revisões regulamentares desde a entrada em vigor do primeiro RCCTE em 1990.

Encontradas as soluções construtivas que caracterizam cada época regulamentar, estas foram inseridas na folha de cálculo proposta pela regulamentação portuguesa actualmente em vigor [REH] e simuladas com recurso ao programa *EnergyPlus* [4]. Através dos resultados gerados,



foi efectuada uma comparação das necessidades de energia entre as estações de aquecimento e arrefecimento. Com os valores de temperatura interior e operativa interior das habitações, gerados pelo *EnergyPlus*, comparam-se os níveis de conforto nas habitações

### **1.3 Estrutura do trabalho**

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos.

O primeiro capítulo é composto por uma breve introdução, que enquadra o tema estudado, refere os objectivos a que a dissertação se dispõe a alcançar e explicita a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo, traduzido pelo comportamento térmico dos edifícios, enuncia os princípios teóricos e justificativos da base do estudo e é dividido em cinco subcapítulos. O primeiro é composto pela evolução regulamentar, que explicita os vários regulamentos, a sua evolução e o modo como surgem. O segundo enuncia os diferentes zonamentos climáticos em Portugal, segundo os regulamentos. O terceiro apresenta a evolução das envolventes dos edifícios, face à evolução regulamentar. No quarto subcapítulo é explicado o programa de simulação dinâmico utilizado e o seu funcionamento. Por último, aborda-se a problemática do conforto térmico, sendo subdividido em três módulos: no primeiro, as considerações gerais explicativas do que é o conforto térmico, no segundo e terceiro são apresentados respectivamente os conceitos de frequência acumulada e os modelos adaptativos, explicando-se o seu funcionamento e a sua utilização para a análise do conforto dos edifícios.

O terceiro capítulo, metodologia de estudo, é dividido em quatro subcapítulos. O primeiro, descrição do edifício, apresenta a arquitetura, os elementos de sombreamento e as soluções construtivas adotadas no projecto do edifício em estudo. No segundo é feita a descrição e caracterização climática das zonas estudadas. No terceiro, é explicada a metodologia utilizada para a obtenção de resultados. No quarto subcapítulo são explicados os vários pressupostos do *software Energy Plus*, o modelo utilizado, a caracterização climática das regiões estudadas e os resultados extraídos da ferramenta de cálculo.

No quarto capítulo, análise de resultados, são analisados os resultados resultantes das variações regulamentares e das regiões consideradas.

O quinto e último capítulo apresenta as conclusões de todo o estudo efectuado.



## 2. Comportamento térmico dos edifícios

O domínio das ciências ligadas ao comportamento térmico dos edifícios é cada vez mais um factor de grande importância nos tempos actuais [2]. O aumento das preocupações com a qualidade das envolventes, o conforto térmico dos utilizadores dos edifícios e as questões ligadas à sustentabilidade e economia de energia dos edifícios, desencadeou a publicação de legislações que definem as características térmicas dos edifícios. Cabe ao presente capítulo descrever as alterações que têm vindo a surgir na regulamentação portuguesa e a influência destas nas envolventes dos edifícios e, por conseguinte, no comportamento térmico destes.

Este capítulo é dividido em cinco subcapítulos, onde são explicadas e justificadas as bases teóricas para a elaboração deste estudo. Em primeiro, é descrito a evolução dos regulamentos, em segundo o zonamento climático, em terceiro a evolução das envolventes dos edifícios por influência do desenvolvimento regulamentar, em quarto a simulação do conforto térmico e por último é abordado o tema do conforto térmico e as suas formas de análise.

### 2.1 Evolução dos regulamentos

A necessidade de melhorar a salubridade e higiene nos edifícios, assim como o aumento do conforto térmico das populações sem a adição de consumos de energia, devido à crise energética sentida na Europa a partir de 1970, motivou a criação do primeiro instrumento legal em que se regulamenta as condições térmicas dos edifícios em Portugal.

Assim, nasce em 1991 o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) [3], que visa o incremento de aspectos térmicos e energéticos ainda na fase de projecto, por forma a criar melhores condições de conforto térmico no interior dos edifícios, sem aumento dos consumos de energia anuais. O RCCTE fomentou requisitos de qualidade térmica das envolventes, através da implementação de coeficientes de transmissão térmica máximos, com o intuito de diminuir o fenómeno de condensações superficiais, melhorando a salubridade e higiene nos edifícios. O regulamento introduziu ainda uma metodologia de cálculo das necessidades nominais de energia para as estações de aquecimento e arrefecimento. Esta metodologia baseia-se no princípio de estimar a energia necessária para manter um edifício a uma temperatura constante de 18°C e 25°C nas estações de aquecimento e arrefecimento, respetivamente, através da quantificação das trocas térmicas entre o interior dos edifícios e o ambiente exterior. Os valores das necessidades energéticas assim estimadas, não pode ultrapassar os valores limite definidos para cada estação. Estes valores não representam necessariamente o consumo real dos edifícios, já que os ocupantes não impõem, normalmente, a permanência de situações iguais às temperaturas referenciadas, 18°C e 25°C. Atendendo às necessidades de energia gera-se uma ferramenta que possibilita a comparação de resposta térmica entre edifícios, ainda na fase de licenciamento, conseguindo referenciar no mesmo ambiente, qual o mais frio para estação de aquecimento, e o mais quente para a estação de arrefecimento [3].

A reformulação do primeiro RCCTE foi justificada com a necessidade de introduzir diretrizes que possibilitassem um maior cumprimento do regulamento, fundamentando que não existia uma fiscalização adequada por parte das entidades licenciadoras. Era então incutido um aumento do grau de exigência da formação profissional dos técnicos, responsáveis pela comprovação dos requisitos e penalizações para o incumprimento de tal regulamento, aumentando assim a credibilidade e probabilidade de sucesso do decreto-Lei [5]. Outra justificação para a criação de um novo regulamento foi a transposição da Diretiva Europeia 2002/91/CE, de 16 de Dezembro [6], para a regulamentação Portuguesa e o aumento esperado, relativo aos hábitos de consumo de energia no sector dos edifícios, da utilização e implementação de mecanismos de climatização mecânicos, como por exemplo, o recurso à utilização de ar condicionado para uma manutenção de temperaturas ideais no interior dos edifícios. Surge então o RCCTE 2006, revogando o RCCTE 1990.

O protocolo de Quioto trouxe à Europa uma responsabilidade ambiental elevada. Foi então publicada a Diretiva Europeia 2002/91/CE [6], com a finalidade de conceber edifícios com uma funcionalidade mais sustentável, proporcionando um aumento do conforto térmico dos edifícios sem no entanto haver um incremento dos consumos energéticos. A diretiva implementou uma metodologia de cálculo da eficiência energética dos edifícios. Esta metodologia permitiu a implementação dos requisitos ao nível regional de forma diferenciada, integrando, para além de isolamento térmico, outros fatores importantes, como a instalação de aquecimento e arrefecimento ambiente, a aplicação de fontes de energia renováveis e a concepção dos próprios edifícios. A diretiva introduziu ainda a certificação energética dos edifícios em situação de transacção e remodelação e a obrigação de inspeções periódicas de caldeiras e sistemas de climatização em determinados casos [6].

Através da transposição da Diretiva Europeia 2002/91/CE, surge a publicação de três documentos legislativos, a 4 de Abril de 2006 [6]. O Decreto-Lei nº78/2006 [7], designado por Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE), o Decreto-Lei nº79/2006 [8], revisão do existente Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização dos Edifícios (RSECE), que implementava a diretiva de uma obrigatoriedade de inspeção regular de todos os equipamentos, e o Decreto-Lei 80/2006 [9] correspondente à reformulação do RCCTE.

O Regulamento da Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) de 4 de Abril de 2006, manteve a identidade do regulamento de 1990, adoptando a mesma estratégia de aumentar o conforto térmico sem a ampliação dos consumos de energia e o incremento de uma maior qualidade térmica da envolvente dos edifícios. No RCCTE de 2006, a temperatura base para o cálculo das necessidades energéticas na estação de aquecimento sofreu um aumento de 18°C para 20°C. Continuou bem presente a diferenciação do cálculo de necessidade de energia entre as estações de aquecimento e arrefecimento e foi desenvolvido e incrementado o cálculo das necessidades de energia para águas quentes e sanitárias. As necessidades apoiam-se em valores climáticos atualizados, resultado da obrigação implícita da implementação de sistemas que recorrem a energias renováveis. De forma a aumentar o impacto dos regulamentos nos consumos energéticos do país, foram estabelecidos valores máximos para as necessidades nominais de energia útil de aquecimento e arrefecimento e de preparação de águas quentes sanitárias, bem como para as necessidades globais de energia primária, que não poderia ser excedida. A imposição de coeficientes máximos para uma melhor qualidade da envolvente estaria de novo presente no regulamento reformulado, minimizando as situações de patologia nos elementos de construção, aumentando assim a durabilidade dos elementos e as situações de conforto, sem um gasto exagerado de energia [9].

A 19 de Maio de 2010, a Diretiva Europeia 2002/91/CE é revogada com a publicação da Diretiva Europeia nº 2010/31/EU [10]. Foi criado um novo diploma, que reformulou a antiga legislação com o objetivo de clarificar algumas das ideias dos artigos iniciais e introduzir o reforço da promoção do desempenho energético nos edifícios, com o princípio de levar os Estados-Membros a cumprir as metas delineadas para 2020, explícitas no protocolo de Quioto.

Como consequência desta alteração, entra em vigor a 30 de Novembro de 2013, o Decreto-Lei nº118/2013 [11], servindo de transposição da directiva europeia para a legislação Portuguesa. O Decreto-Lei nº118/2013 [11] publica assim o Sistema de Certificação Energética (SCE), o Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviço (RECS), com os dois últimos fazendo parte integrante do primeiro, havendo assim uma diferenciação clara entre as imposições para edifícios habitacionais e edifícios de comércio e serviços. Esta diferenciação parte também na perspetiva de clarificar quais os requisitos a serem respeitados, para edifícios novos, edifícios sujeitos a grandes intervenções e edifícios existentes. O REH regressa a temperatura de conforto de 18°C para o cálculo das necessidades de energia na estação de aquecimento. Outra novidade do REH reside na divulgação da parte técnica com recurso a portarias que são de fácil adaptação. Assim, desde a publicação do Decreto-Lei nº118/2013, foram realizadas várias actualizações de forma a obrigar que os edifícios sejam mais eficientes

do ponto de vista energético. Em 2015, é feita uma reestruturação do REH, sendo implementada uma grande diminuição dos coeficientes de transmissão térmicas das envolventes, com o intuito de limitar as condensações dos elementos constituintes das soluções construtivas e , consequentemente, aumentar a resistência térmica dos edifícios [12].

## 2.2 Zonamento climático

Desde a entrada em vigor do primeiro RCCTE (1990) até às atualizações finais conhecidas nos dias de hoje do REH, uma das preocupações conhecidas dos regulamentos é a minimização da utilização de meios artificiais de climatização. Assim, tornou-se obrigatório promover os ganhos de energia solar através da envolvente opaca ou envidraçados no Inverno e restringir os ganhos no Verão. Para tal, é essencial considerar a influência do clima dos locais de implementação dos edifícios para a correcta previsão do seu comportamento térmico.

Assim, surge o zonamento climático, que divide o país em dois grupos distintos de períodos climáticos, estação de aquecimento e de arrefecimento. Ambas são subdivididas em três graus de severidade climática, que dividem o país em três zonas distintas em cada estação, como demonstra a Figura 2.1. A subdivisão é feita para a aplicação de requisitos de qualidade térmica da envolvente, que depende da zona climática onde o edifício será inserido.

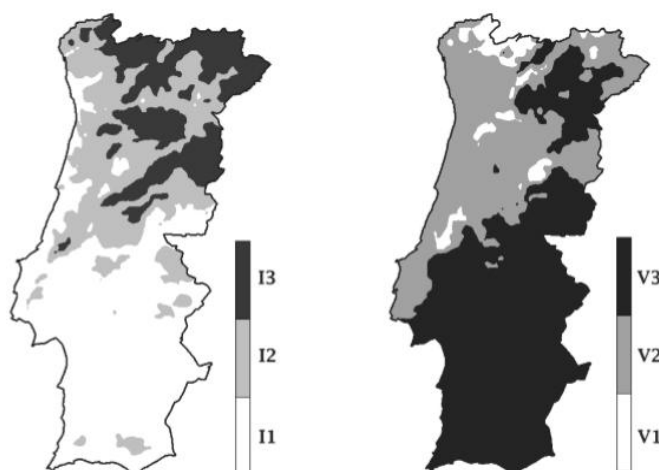


Figura 2.1- Zonamento climático em Portugal (Fonte:[13])

A estação de aquecimento tem como nomenclatura a simbologia I1, I2 e I3 para a caracterizar. A severidade aumenta de I1 para I3. A atribuição de gravidade a cada zona é feita com base nos graus-dia, GD. Cada região do país tem um número de graus-dia de referência. É atribuída uma altitude de referência e uma constante  $a(^{\circ}\text{C}/\text{m})$ , declive para ajustes em altitude, a cada região. Os últimos dois termos são inseridos na equação (2.1) em conjunto com o valor de graus-dia de referência e a altitude do terreno em que o edifício será inserido.

$$X = X_{ref} + a(z - z_{ref}) \quad (2.1)$$

O valor resultante da expressão, para o presente exemplo, designa-se por graus-dia e será comparado com intervalos pré definidos, especificados na Tabela 2.1, sendo deste modo atribuída a zona climática para o projecto em estudo.

Tabela 2.1- Critérios para a determinação da zona climática de Inverno (Fonte: [14])

<b>Critério</b>	$GD \leq 1300$	$1300 < GD \leq 1800$	$GD > 1800$
<b>Zona</b>	I1	I2	I3

A estação de arrefecimento é subdividida em V1, V2 e V3, aumentando a severidade de V1 para V3. A atribuição para cada região é feita com base na temperatura exterior média, que é calculada de maneira similar aos graus-dia, segundo a equação (2.1). O que difere é a utilização de uma nova constante  $a(C^{\circ}/km)$  e, em vez de utilizar um valor de graus-dia de referência, utiliza uma temperatura média exterior de referência. Após ser atribuído um valor característico de temperatura média exterior, este será comparado com intervalos de temperatura média exterior já estipulados na Tabela 2.2, e desta forma é atribuída uma zona climática para o projecto em estudo.

Tabela 2.2- Critérios para a determinação da zona climática de Verão ( Fonte: [14])

<b>Critério</b>	$\theta_{ext,v} \leq 20^{\circ}C$	$20^{\circ}C < \theta_{ext,v} \leq 22^{\circ}C$	$22^{\circ}C > \theta_{ext,v}$
<b>Zona</b>	V1	V2	V3

Os parâmetros climáticos na estação de aquecimento são:

- O número de graus-dias correspondente à estação convencional de aquecimento (GD);
- Duração da estação de aquecimento (M);
- Temperatura exterior média do mês mais frio da estação de aquecimento ( $\theta_{ext,i}$ );
- Energia solar média mensal durante a estação, recebida numa superfície vertical orientada a Sul, em kWh/m<sup>2</sup>.mês ( $G_{sul}$ ).

E na estação de arrefecimento:

- Temperatura exterior média ( $\theta_{ext,v}$ );
- Energia solar acumulada durante a estação, recebida na horizontal (inclinação 0°) e em superfícies verticais (inclinação 90°) para os quatro pontos cardeais e os quatro colaterais ( $I_{sol}$ ).

## 2.3 Evolução das envolventes dos edifícios

Os sistemas construtivos do parque habitacional português têm sofrido uma grande evolução até aos dias de hoje. Inicialmente, sem a existência do betão, as estruturas dos edifícios eram constituídas por alvenaria de pedra. Com o aparecimento do betão, houve uma fase em que as lajes dos edifícios eram feitas com este material e descarregavam os esforços diretamente nas paredes de alvenaria de pedra. Posteriormente a esta época, surgem os edifícios denominados como recentes, constituídos por estruturas porticadas de betão armado, que suportam os esforços do edifício por meio de lajes, vigas e pilares, e as paredes apenas servem de barreira entre o interior e o exterior das habitações. Surge então as paredes de alvenaria de tijolo, sendo uma solução que traz leveza aos edifícios e consequentemente uma diminuição de esforços [15].

A implementação de estruturas porticadas de betão armado como sistema construtivo dos edifícios, levou à utilização, como parede exterior, de soluções de parede dupla de alvenaria de tijolo. Esta solução era constituída por dois panos de alvenaria de tijolo separados por um espaço de ar, com o objetivo de criar uma descontinuidade entre os dois elementos, impossibilitando a entrada de águas exteriores para o interior dos edifícios. Os elementos

estruturais eram cobertos apenas por revestimentos correntes. A implementação do primeiro RCCTE em 1990 trouxe a caracterização dos projectos relativamente ao comportamento dos edifícios, face aos ambientes onde estão inseridos, através do cálculo das necessidades de energia para as estações de aquecimento e arrefecimento. Como referido anteriormente, esses cálculos servem para licenciamento mas também como referência em termos de comparação entre a qualidade dos edifícios. A resistência térmica dos elementos construtivos das envolventes dum edifício passa a desempenhar um papel fundamental na caracterização do comportamento térmico. Assim, foram introduzidos valores máximos admissíveis e valores de referência no coeficiente de transmissão térmica das envolventes como forma de minimizar os fenómenos de condensações superficiais e aumentar o conforto térmico dos utilizadores. Apresentam-se na Tabela 2.3 os valores dos coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos e na Tabela 2.4 os valores de transmissão térmica superficiais de referência, de acordo com o zonamento climático.

Tabela 2.3- Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos, RCCTE 1990.

$U_{\text{máx}}$ [W/(m <sup>2</sup> .°C)]	Zona climática		
	I1	I2	I3
Elementos exteriores			
Zonas opacas horizontais	1,25	1	0,9
Zonas opacas verticais	1,8	1,6	1,45
Elementos interiores (**)			
Zonas opacas horizontais	1,65	1,3	1,2
Zonas opacas verticais	2	2	1,9
(**) para zonas anexas não uteis			

Tabela 2.4- Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência de elementos opacos e de vãos envidraçados, RCCTE 1990.

$U_{\text{ref}}$ [W/(m <sup>2</sup> .°C)]	Zona climática		
	I1	I2	I3
Zonas opacas horizontais	1,1	0,85	0,95
Zonas opacas verticais	1,4	1,2	0,75
Vãos Envidraçados	4,2	4,2	4,2

Foi então visível, a partir da implementação do RCCTE 1990, apesar de não ser explícito o seu uso, a utilização habitual de materiais com baixas condutibilidades térmicas, denominados de materiais com alta resistência térmica (XPS, EPS) no interior do espaço de ar [16]. O objectivo era aumentar a resistência térmica das envolventes, minimizando as trocas entre o interior e o exterior e consequentemente, diminuir as necessidades energéticas dos edifícios, para as estações de aquecimento e de arrefecimento. Foi detectado contudo, um problema: a não correcção das pontes térmicas planas (pilares, vigas, caixa de estores, lajes). Esta incongruência leva à existência de elementos onde as trocas de calor entre o ambiente exterior e interior continuam elevados, diminui o coeficiente de transmissão térmico médio da envolvente exterior e mantém a probabilidade de fenómenos de condensação, nos elementos não corrigidos.

O RCCTE 2006 impõe para as denominadas pontes térmicas planas – heterogeneidades construtivas e térmicas da envolvente nas quais se admite que o fluxo térmico é unidimensional e perpendicular à superfície – que as perdas e os ganhos térmicos correspondentes são calculados a partir de um valor de coeficiente de transmissão térmica superficial (U), de modo idêntico ao adoptado em superfície corrente das paredes. São aplicadas restrições de modo a minimizar o risco de condensações superficiais nas pontes térmicas. Tais exigências caracterizam-se pelos valores do respetivo coeficiente U não poderem exceder os valores máximos definidos para a zona corrente da parede (Tabela 2.3) e não poderem tomar valores superiores ao dobro do valor de U da zona corrente na qual estão inseridas as respetivas pontes térmicas [16].

A imposição dessas exigências regulamentares, ditou assim o incremento de correções, com recorrência a elementos com baixa condutibilidade térmica, das pontes térmicas planas. Porém, o recurso a paredes duplas de tijolo com isolamento térmico na caixa-de-ar continuou corrente na presente época regulamentar. As correções eram feitas na altura, de duas maneiras distintas, ou pelo exterior ou pelo interior do edifício. A correção pelo exterior trouxe uma maior área de correção do que a solução pelo interior, pois pelo exterior consegue-se cobrir, com materiais com baixa condutibilidade térmica, o pilar, a viga e a laje, sendo que pelo interior apenas o pilar e a viga ficam cobertos. Contudo, na solução de correção pelo exterior, levantam-se algumas questões relacionadas com a aderência do revestimento exterior da parede a alguns daqueles produtos, devido à própria fixação do produto ao suporte, aos riscos de fendilhação do revestimento, devido às diferentes características térmicas, hídricas e físicas dos suportes, a alvenaria e o isolamento térmico. No caso da solução pelo interior, pode admitir-se que as solicitações termo-higrométricas são atenuadas devido às condições menos adversas presenciadas no ambiente interior e que são mais variadas as opções em termos, quer do isolante térmico, quer da respectiva solução de protecção e de revestimento. São várias as soluções propostas para realizar esta solução de correção de pontes térmicas planas. Alguns aspectos devem ser analisados, como a aderência do isolante ao suporte e a aderência dos rebocos, estuques e painéis de revestimento ao isolante; a resistência mecânica do revestimento de protecção; o risco de fendilhação dos revestimentos e a compatibilização dos aspectos arquitectónicos. Em termos práticos correntes, quaisquer das soluções de correcção térmica, exterior ou interior, atrás referidas, além de criar uma zona de transição potencialmente problemática, apresenta uma outra limitação, a falta de continuidade do isolamento térmico da parede em superfície corrente e da ponte térmica plana. Apesar de na perspectiva da verificação regulamentar este facto não ser penalizador, tal falta de continuidade cria uma zona de transferência térmica linear que em condições adversas pode estar na origem da ocorrência de condensações superficiais localizadas [16].

Uma outra diferença, entre o RCCTE 1990 e o RCCTE de 2006, foi a atualização dos coeficientes de transmissão térmica de referência, passando estes a tomar os valores assinalados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5- Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência de elementos opacos e de vãos envidraçados, RCCTE 2006.

Uref [W/(m².°C)]	Zona climática		
	I1	I2	I3
Elementos exteriores em zona corrente			
Zonas opacas verticais	0,7	0,6	0,5
Zonas opacas horizontais	0,5	0,45	0,4
Elementos interiores em zona corrente (**)			
Zonas opacas verticais	1,4	1,2	1
Zonas opacas horizontais	1	0,9	0,8
Envidraçados	4,3	3,3	3,3
(**) para zonas anexas não uteis			



Com a entrada em vigor do REH 2013, uma nova atualização foi feita nos coeficientes de transmissão térmica quer a nível de valores máximos quer a nível de valores de referência. Tais valores encontram-se indicados na Tabela 2.6 e Tabela 2.7.

Tabela 2.6- Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos, REH 2013.

$U_{\text{máx}}$ [W/(m <sup>2</sup> .°C)]		Zona climática		
		I1	I2	I3
Elemento da envolvente em contacto com o exterior ou espaços não úteis com $b_{tr} > 0,7$	Elementos verticais	1,75	1,6	1,45
	Elementos horizontais	1,25	1	0,9
Elemento da envolvente em contacto com outros edifícios ou espaços não úteis com $b_{tr} \leq 0,7$	Elementos verticais	2	2	1,9
	Elementos horizontais	1,65	1,3	1,2

Tabela 2.7- Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência de elementos opacos e de vãos envidraçados, REH 2013.

$U_{\text{ref}}$ [W/(m <sup>2</sup> .°C)]		Zona climática		
		I1	I2	I3
Elemento da envolvente em contacto com o exterior ou espaços não úteis com $b_{tr} > 0,7$	Elementos verticais	0,5	0,4	0,35
	Elementos horizontais	0,4	0,35	0,3
Elemento da envolvente em contacto com outros edifícios ou espaços não úteis com $b_{tr} \leq 0,7$	Elementos verticais	1	2	1,9
	Elementos horizontais	0,8	0,7	0,6
Vãos envidraçados (portas e janelas)		2,9	2,6	2,4
Elementos em contacto com o solo		0,5		

Verificou-se uma diminuição dos coeficientes, de regulamento para regulamento, que leva indiretamente a um aumento da utilização de soluções construtivas com uma maior resistência térmica, para os  $N_{ic}$  e  $N_{vc}$  satisfazerem os seus valores limites  $N_i$  e  $N_v$ . Através da utilização de parede dupla, a procura de uma maior resistência térmica na solução conduz ao preenchimento parcial dos espaços de ar com um isolante térmico, o que do ponto de vista do desempenho térmico e de protecção face ao risco de infiltrações de água da chuva é favorável. O aumento da espessura do isolante térmico em superfície corrente obriga, com vista à satisfação das exigências regulamentares atrás referidas, ao aumento da espessura do isolante térmico na zona de ponte térmica plana, que leva cada vez mais a uma maior preocupação com os aspectos atrás referidos [16].

Muitas são as propostas para a melhoria de tais soluções de correcção das pontes térmicas planas, sendo a mais utilizada nos dias de hoje o sistema ETICS (*external thermal insulation*

*composite systems*). Esta solução é constituída por um pano simples de alvenaria de tijolo, cujas dimensões variam, consoante os objectivos pretendidos, sendo revestido por isolantes térmicos, na maior parte das vezes EPS e XPS, trazendo à envolvente opaca do edifício valores reduzidos do coeficiente de transmissão térmica (U), quer em superfície corrente, quer nas zonas de ponte térmica plana. Na presente época regulamentar era normal o uso de isolamentos térmicos com dimensões de 3cm e 4cm porém, em casos pontuais utilizavam-se valores superiores [16].

O REH 2016 diminui fortemente os valores do coeficiente de transmissão térmica máximos, passando estes a ter valores semelhantes aos valores de referência, e são impostos valores máximos para os envidraçados. A Tabela 2.8 e a Tabela 2.9 apresentam os valores acima mencionados.

Tabela 2.8- Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos e de vãos envidraçados, REH 2016.

U <sub>máx</sub> [W/(m².°C)]		Zona climática		
		I1	I2	I3
Elemento da envolvente em contacto com o exterior ou espaços não úteis com b <sub>tr</sub> >0,7	Elementos verticais	0,5	0,4	0,35
	Elementos horizontais	0,4	0,35	0,3
Elemento da envolvente em contacto com outros edifícios ou espaços não úteis com b <sub>tr</sub> ≤0,7	Elementos verticais	2	2	1,9
	Elementos horizontais	1,65	1,3	1,2
Vãos envidraçados (portas e janelas)		2,8	2,4	2,2

Tabela 2.9- Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência de elementos opacos e de vãos envidraçados, REH 2016.

U <sub>ref</sub> [W/(m².°C)]		Zona climática		
		I1	I2	I3
Elemento da envolvente em contacto com o exterior ou espaços não úteis com b <sub>tr</sub> >0,7	Elementos verticais	0,5	0,4	0,35
	Elementos horizontais	0,4	0,35	0,3
Elemento da envolvente em contacto com outros edifícios ou espaços não úteis com b <sub>tr</sub> ≤0,7	Elementos verticais	0,8	0,7	0,6
	Elementos horizontais	0,6	0,6	0,5
Vãos envidraçados (portas e janelas)		2,8	2,4	2,2
Elementos em contacto com o solo		0,5		

Esta diminuição dos coeficientes ditou um aumento drástico da espessura de isolamento térmico, em alvenarias de tijolo com recurso a sistema ETICS, passando este de 4cm para 7cm ou 8cm dependendo da zona climática onde está inserido o projecto e a espessura de alvenaria utilizada.

A evolução da legislação térmica portuguesa dos edifícios promoveu a modificação do parque habitacional, a nível das soluções construtivas dos edifícios. É visível, de regulamento para regulamento, um aumento da resistência térmica dos edifícios. A caracterização do parque habitacional de Lisboa, feito através da análise do censo e informações gerais, mostra esse mesmo aumento da resistência térmica dos edifícios [17]. As tabelas 2.10, 2.11 e 2.12, mostram as soluções construtivas, que representam o parque habitacional de Lisboa, em termos de paredes, pisos e envidraçados, conforme o período de construção.

Tabela 2.10- Tipo de parede por período de construção (Fonte: [17]).

<b>Período de construção</b>	<b>Paredes</b>
1961-1990	Alvenaria de tijolo duplo 11+11
1991-2005	Alvenaria de tijolo duplo 15+11 com isolamento
Depois de 2006	Alvenaria de tijolo duplo 15+11 com isolamento

Tabela 2.11- Tipo de laje por período de construção (Fonte: [17]).

<b>Período de construção</b>	<b>Laje de piso</b>
1961-1990	Madeira e betão sem isolamento
1991-2005	Betão sem isolamento
Depois de 2006	Betão com isolamento

Tabela 2.12- Tipo de janela por período de construção (Fonte: [17]).

<b>Período de construção</b>	<b>Janelas</b>
1961-1990	Vidro simples com caixilharia de alumínio
1991-2005	Vidro simples com caixilharia de alumínio com corte térmico
Depois de 2006	Vidro duplo com caixilharia de PVC com corte térmico

Com o intuito de variar alguns parâmetros considerados importantes para a eficiência energética dos edifícios, e de seguir a ideia do aumento da resistência térmica dos edifícios com a evolução regulamentar, foram adotados, a nível das envolventes opacas, quatro soluções distintas, em que cada uma representa um regulamento. Para o RCCTE 1990 foi utilizada uma parede de alvenaria dupla de tijolo com isolamento térmico e sem correcção das pontes térmicas e para o RCCTE 2006 a mesma parede dupla com isolamento térmico porém, recorreu-se à correcção das pontes térmicas planas com isolamento térmico. A diferenciação entre o RCCTE e REH foi feita com a mudança de solução construtiva, sendo utilizado para o REH 2013 ETICS e para REH 2016 ETICS uma maior espessura de isolamento que a anterior. A nível de lajes e janelas, utilizou-se como base a caracterização do parque habitacional de Lisboa, representada nas tabelas 2.11 e 2.12. No capítulo 3.1 são descritas com maior pormenor as soluções escolhidas para o presente estudo.

## 2.4 Simulação do comportamento térmico

A simulação dinâmica é uma ferramenta importante usada para detalhar e avaliar o conforto térmico e os gastos energéticos nos edifícios. Os métodos chamados estáveis, como por exemplo a legislação térmica portuguesa dos edifícios, não fornecem informações suficientemente detalhadas para suportar decisões para a melhor projecção dos edifícios. É pois útil utilizar *softwares* de simulação dinâmica, que são uma boa solução para obtenção destes valores detalhados [18].

O programa de simulação dinâmica utilizado na presente dissertação é o *EnergyPlus*. Foi criado pelo departamento de energia dos Estados Unidos e segue os requisitos da norma ASHRAE140 e tem como base dois programas, BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) e DOE-2. Este é um programa simulação de energia de edifícios, utilizado por engenheiros, arquitectos e investigadores, que o usam para modelar o consumo de energia para aquecimento, arrefecimento, ventilação, iluminação e uso de água quente nos edifícios [4]. O *EnergyPlus* inclui algumas capacidades que se destacam para a realização do presente estudo e que justificam a sua adopção para a utilização na presente dissertação. O programa permite uma fiabilidade na construção de um modelo geométrico, com a divisão do edifício em análise em zonas térmicas. Possibilita a caracterização exaustiva das ações de natureza climática, das propriedades dos materiais, dos sistemas de ventilação, dos ganhos internos de ocupação, de equipamento, de iluminação e ainda a facilidade de implementação de estudos analíticos de sensibilidade ao modelo criado, com variação expedita dos parâmetros de simulação e posterior análise simplificada de resultados. Permite também analisar os parâmetros higrotérmicos de que depende o estudo do conforto térmico (temperatura do ar interior, humidade relativa, velocidade do ar, temperatura média radiante, nível de atividade e vestuário do ocupante) e os parâmetros de que depende o estudo energético (consumos energéticos de aquecimento e de arrefecimento) [19]. Os resultados são apresentados como o utilizador pretender, seja de hora a hora, mês a mês ou ano a ano. É também, um *software* testado e validado desde 1993 e atualmente é reconhecido como uma ferramenta de referência para simulação térmica [18].

É possível ilustrar, resumidamente, a estrutura de funcionamento do *EnergyPlus* através da Figura 2.2:

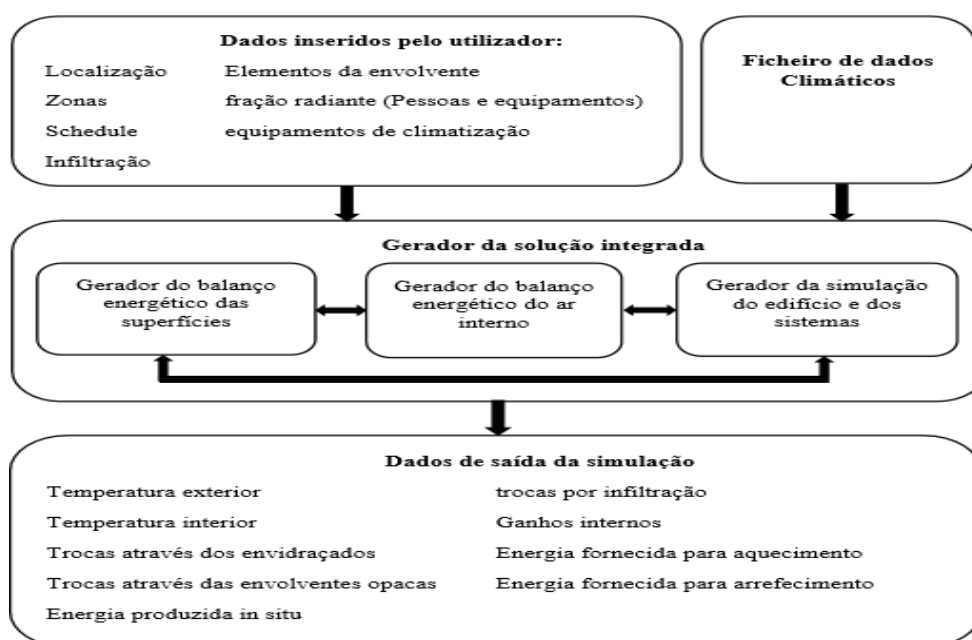


Figura 2.2- Diagrama do funcionamento do *EnergyPlus* (Fonte: [20]).

## **2.5 Conforto térmico**

A atribuição a um espaço habitável de condições ideais de conforto depende particularmente de alguns factores: temperatura, humidade relativa e velocidade do ar. Em condições equivalentes, a adaptação individual será distinta em função da actividade, do tipo e quantidade de roupa e, em último caso, da resposta psicológica de cada pessoa às condições existentes [2]. As sensações de conforto, de frio ou de calor, são função antes de mais, da resposta dos mecanismos de compensação do corpo face às temperaturas envolventes. Tais mecanismos designam-se de metabolismo, que se traduz por um conjunto de reacções químicas que asseguram a manutenção da temperatura ideal do corpo humano [2].

Associado à neutralidade térmica e ao equilíbrio térmico surge o conforto térmico. A neutralidade térmica depende de factores ambientais e dos tipos de ocupação das habitações porem, também está associada a factores individuais de natureza psicológica e sociológica, designadamente a idade, o estrato sociocultural, o sexo, adaptação ecológica às regiões, o estado mental, a educação e os hábitos[19].

### **2.5.1 Considerações gerais**

A legislação térmica portuguesa dos edifícios explicita um intervalo de temperatura de conforto térmico de 18°C a 25°C, para o cálculo das necessidades de energia nas estações de aquecimento e arrefecimento, respetivamente. Apenas o RCCTE 2006 modificou esse intervalo, utilizando 20°C ao invés dos 18°C. Contudo não é possível determinar se os ocupantes dos edifícios proporcionam ambientes onde se consiga alcançar na totalidade do tempo tais temperaturas de referência. O uso de dispositivos mecânicos de climatização são o principal recurso utilizado pelo regulamento; contudo, a utilização ou a instalação de tais dispositivos nem sempre é viável nas habitações. Numa abordagem mais flexível, designada por adaptativa, consideram-se gamas de temperatura de conforto e não valores fixos, pelo facto de se verificar que os ocupantes, quando têm a possibilidade de exercer adaptação, atuando quer nos sistemas ou nos elementos da envolvente, quer na sua atividade ou vestuário, são mais tolerantes em termos de condições de conforto[21]. É feita na presente dissertação uma análise de resultados do conforto térmico dos edifícios, resultante da utilização do intervalo fixo estipulado pela legislação portuguesa e de gamas de temperaturas variáveis, consoante a adaptação do utente.

### **2.5.2 Frequência acumulada**

A frequência acumulada de um determinado objecto determina a percentagem que este existe num grupo definido de vários objectos. Este é um método utilizado por Curado A.[19] para determinar a percentagem de conforto térmico correspondentes a várias variáveis construtivas e também por Curado A. et al [22] para estudar a influência da localização dos edifícios na temperatura interior destes. Recorreu-se a esse método com o intuito de analisar as percentagens de temperaturas interiores da habitação, que não se situam dentro do intervalo de temperaturas estipulado pela regulamentação. Estes resultados indicam a percentagem de desconforto e de conforto no período estudado.

### **2.5.3 Modelo adaptativo**

Existem dois tipos de quantificação e avaliação do conforto térmico: o método analítico e o método adaptativo. A ideia adaptativa segue um rumo diferente da abordagem analítica. Ambas são caracterizadas pela obtenção de resultados através das sensações produzidas por pessoas expostas a determinados ambientes. O método analítico apresenta valores através de resultados experimentais em câmaras climáticas com a possibilidade de ajuste de algumas variáveis ambientais, tais como temperatura do ar, velocidade do ar, temperatura superficial e humidade do ar. Assim, o balanço energético dos ocupantes é feito num regime estacionário. A

abordagem adaptativa advém de resultados de campo onde as variáveis ambientais são medidas diretamente nos ambientes reais, onde as pessoas praticam as suas atividades, onde o resultado do balanço energético dos organismos é realizado em regime dinâmico, considerando que os ocupantes podem interagir física e psicologicamente com o ambiente térmico que os rodeia [19].

O modelo adaptativo foi o escolhido para a apresentação de dados no presente estudo. Existem três modelos distintos que apresentam intervalos adaptativos de temperatura: modelo de conforto adaptativo ASHRAE 55 [23] modelo de conforto adaptativo LNEC [21] e modelo de conforto adaptativo EN 15251 [24]. Estes modelos são apresentados nos capítulos 2.5.3.1, 2.5.3.2, 2.5.3.3, respetivamente.

### 2.5.3.1 Modelo de conforto adaptativo ASHRAE 55

O modelo de conforto adaptativo que segue as diretrizes da norma ASHRAE 55 abrange um modelo de avaliação de conforto térmico, restringido a edifícios condicionados naturalmente, onde os utilizadores podem adaptar livremente o seu vestuário às condições ambientes interiores ou exteriores [23] [19]. A Figura 2.3 representa graficamente o intervalo de temperaturas de conforto do respetivo modelo.

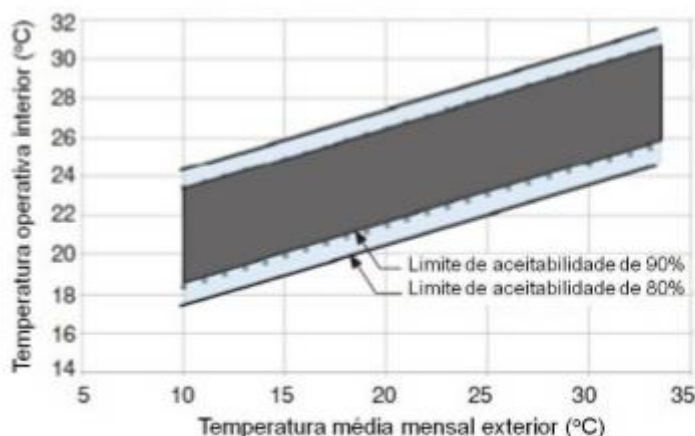


Figura 2.3- Valores recomendados da temperatura operativa de conforto em função da temperatura média mensal, ASHRAE 55 (Fonte: [19]).

O intervalo de conforto explicitado na Figura 2.3 é representado por uma temperatura operativa interior de conforto ( $T_{oc}$ ), em função da temperatura média mensal exterior ( $T_m$ ). São definidas duas classes de satisfação de conforto dos ocupantes, 80% e 90%, que são a percentagem de pessoas que se sentem confortáveis com as temperaturas apresentadas. A gama de temperaturas representativas da percentagem de 80%, e usadas para a análise de edifícios existentes e reabilitados. A percentagem de 90% aplica-se a edifícios novos onde se exigem níveis elevados de conforto.

A concepção e utilização do modelo adaptativo tem algumas restrições, sendo elas a temperatura média mensal, que apenas inclui temperaturas entre 10°C e 33,5°C. O ambiente térmico é regulado por ventilação natural, isto é, os ocupantes adaptam-se ao ambiente com a abertura e fecho dos vãos envidraçados. Os edifícios podem dispor apenas de sistema de aquecimento, sendo o modelo não válido durante o funcionamento de tais equipamentos. Os ocupantes devem manter níveis de atividade entre 1,0 e 1,3 met (equivalente a atividades como

dormir, ler, estudar) [25] e serem livres de adaptar o vestuário às condições ambientais a que são submetidos.

A equação (2.2), com base no trabalho de Brager & de Dear [26], representa a relação entre a temperatura operativa de conforto e a temperatura média exterior.

$$T_{oc} = 17,8 + 0,31 \times T_m \quad (2.2)$$

$T_{oc}$  - Temperatura operativa interior de conforto [°C]

$T_m$  - Temperatura média mensal exterior [°C]

O intervalo de temperatura operativa interior de conforto é então definido por:

- 80% de aceitabilidade-  $T_{oc} \pm 3,5$
- 90% de aceitabilidade-  $T_{oc} \pm 2,5$

### 2.5.3.2 Modelo de conforto adaptativo LNEC

O LNEC desenvolveu um modelo adaptativo de avaliação das condições de conforto, tendo como base a análise dos resultados obtidos de um conjunto extenso de levantamentos das condições ambientais interiores, realizados em edifícios de serviços e residências, caracterizados por diversos tipos de perfil ocupacional e de percepção térmica manifestada pelos respetivos utilizadores [21]. A nível residencial os edifícios estudados foram subdivididos em dois tipos, lares de idosos e centros de dia, e habitações convencionais. Contudo, as amostras recolhidas das habitações convencionais para o desenvolvimento do modelo foram muito reduzida [21]. Os levantamentos efectuados foram feitos em várias regiões do país e divididos em períodos de Inverno e Verão, acompanhados pelo preenchimento de um questionário específico desenvolvido pelo LNEC [27]. A recolha de dados foi orientada para o levantamento de temperaturas, humidade relativa e velocidade do ar [21]. Foi assim, através de interligação dos dados recolhidos, definido um gráfico com um intervalo de temperatura de conforto, ilustrado na Figura 2.4.

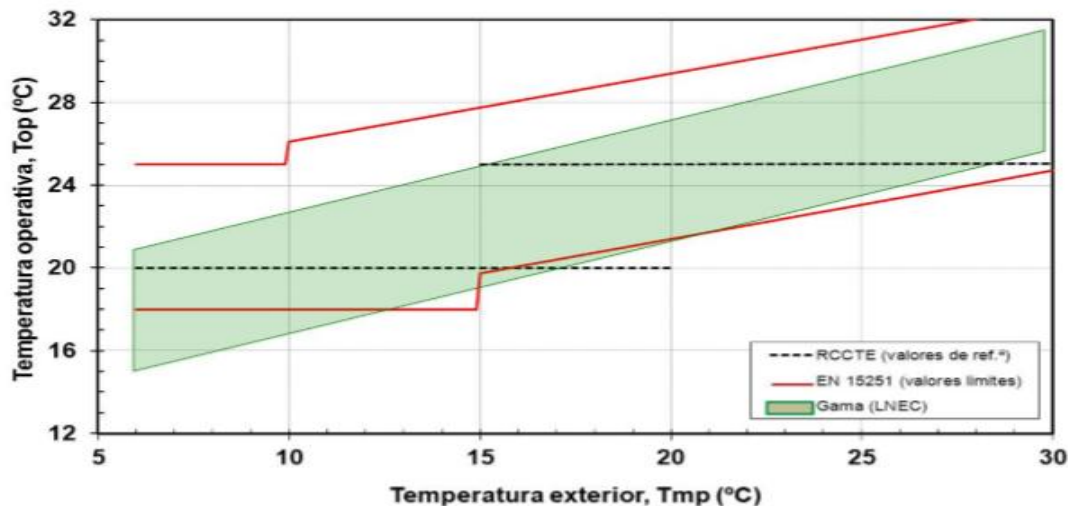


Figura 2.4- Valores de temperatura de conforto térmico, LNEC (Fonte:[28]).

### 2.5.3.3 Modelo de conforto adaptativo EN 15251

A norma EN 15251 [24] estabelece um modelo de conforto adaptativo para a avaliação do conforto nos edifícios. A EN 15251: *Criteria for the indoor environment including thermal, indoor air quality, lighting and noise*, não define apenas requisitos de avaliação da qualidade do ambiente interior numa perspectiva térmica; estabelece também condições da qualidade do ar, da iluminação e do ruído, sendo a sua aplicação determinante na avaliação do desempenho térmico de edifícios novos e existentes [19].

O método proposto de avaliação restringe a sua aplicação a edifícios sem utilização de qualquer sistema mecânico de refrigeração e a ventilação mecânica com recurso a ar não condicionado pode ser usada no Verão. O recurso a ventilação através da abertura e fecho de janelas deve ser o método prioritário de regulação da temperatura. Os edifícios podem ter sistema de aquecimento sem recurso a ventilação mecânica de ar tratado. A taxa metabólica aceitável situa-se dentro do intervalo de 1 a 1,3 met e não pode existir obrigatoriedades de tipos de roupa, possibilitando a adaptação dos ocupantes ao ambiente interior através do vestuário [19].

A equação (2.3) representa a temperatura operativa de conforto em função da temperatura média exterior ponderada ( $T_{mp}$ ), adotada da norma EN 15251 [24].

$$T_{oc} = 18,88 + 0,33 \times T_{mp} \quad (2.3)$$

$T_{oc}$  - Temperatura operativa interior de conforto [°C]

$T_{mp}$  - Temperatura média exterior ponderada [°C]

A temperatura média exterior ponderada é calculada através das temperaturas médias diárias da semana antecedente e depende do tempo que o ocupante da habitação demora a ajustar-se às modificações climáticas exteriores [24]. O cálculo de tal temperatura é representado na equação (2.4).



$$T_{mp} = \frac{(T_{n-1} + 0,8.T_{n-2} + 0,6.T_{n-3} + 0,5.T_{n-4} + 0,4.T_{n-5} + 0,3.T_{n-6} + 0,2.T_{n-7})}{3,8} \quad (2.4)$$

$T_{mp}$  - Temperatura média exterior ponderada [°C]

$T_{n-i}$  - Temperatura média exterior do dia (i) anterior [°C]

A Figura 2.5 e a Figura 2.6, ilustram graficamente os intervalos de temperatura de conforto explicitados pela equação (2.3) com base na norma EN15251. A equação referida abrange o intervalo de temperatura média exterior ponderada de 10°C a 30°C para o limite inferior e de 15°C a 30°C para o limite superior. Quando as temperaturas são abaixo deste intervalo, são utilizados os limites de conforto para edifícios com sistema mecânico de arrefecimento, de acordo com a tabela A.2 do anexo A da norma EN 15251 [24]. Pode então subdividir-se os gráficos em Verão e Inverno.

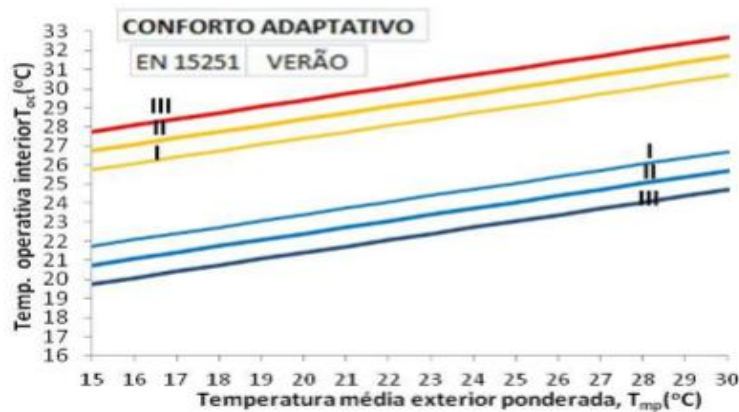


Figura 2.5-Valores recomendados da temperatura operativa de conforto em função da temperatura média exterior ponderada, Verão, EN 15251 (Fonte:[19]).



Figura 2.6-Valores recomendados da temperatura operativa de conforto em função da temperatura média exterior ponderada, Inverno, EN 15251 (Fonte:[19]).

As três categorias representadas, definem o grau de exigência pretendido para o edifício em análise com base na sensação de conforto dos seus ocupantes. Estas categorias são apresentadas na Tabela 2.13.

Tabela 2.13- Descrição das categorias de conforto, EN 15251 (Fonte: Adaptado [24]).

<b>Categoria</b>	<b>Descrição</b>
I	Elevado nível de expectativa e recomendado para espaços ocupados por indivíduos sensíveis e frágeis, com requisitos especiais como doentes, crianças muito pequenas e idosos.
II	Nível normal de expectativa, usado para edifícios novos ou renovados.
III	Nível moderado de expectativa, usado em edifícios existentes.
IV	Valores fora dos critérios acima estabelecidos. Categoria aceite apenas para períodos limitados.

O intervalo de temperaturas operativa de conforto para as categorias I, II e III na estação de Verão são calculadas através da soma e subtração de uma gama de valores apresentados seguidamente:

- Categoria I-  $T_{oc} \pm 2$
- Categoria II-  $T_{oc} \pm 3$
- Categoria III-  $T_{oc} \pm 4$

O modelo de conforto adaptativo utilizado na presente dissertação, para avaliação do conforto na habitação em estudo, nas várias regiões estudadas e as diferentes soluções construtivas adotadas, foi o modelo da norma EN 15251. O modelo do LNEC não foi utilizado, devido aos estudos de campo desenvolvidos, para avaliação das condições de conforto, incidirem sobretudo em edifícios de serviços (escritórios e escolas) e lares de idosos [19]. A diferença entre o modelo ASHRAE 55 e EN15251 consiste basicamente em que o padrão americano adota o modelo adaptativo de Brager & de Dear [26] e o padrão Europeu o modelo desenvolvido no projeto SCAT, com base em estudos de campo realizados em cinco países europeus, incluindo Portugal [29]. Sendo assim, foi dada a preferência pelo modelo que tem como base o clima português e hábitos dos ocupantes portugueses. O modelo de conforto ASHRAE 55 é criticado por utilizar temperaturas médias mensais, pois vai contra o princípio da natureza da dinâmica do conforto humano e torna-se difícil testar o modelo com resultados de simulação dinâmica [30], o que constitui mais uma razão para dispensar tal método.

### 3. Metodologia de trabalho

O presente capítulo é dividido em quatro secções. Inicia-se com a descrição do edifício de estudo e caracteriza os pressupostos utilizados que são comuns aos dois métodos de cálculo distintos, a folha de cálculo do regulamento e a ferramenta de simulação *Energy Plus*. A segunda secção descreve e caracteriza o clima das zonas climáticas estudadas. A terceira secção descreve a metodologia de cálculo para a obtenção de resultados. A quarta e última descreve o programa de simulação *Energy plus* e as considerações utilizadas para a sua elaboração.

#### 3.1 Descrição do edifício

##### 3.1.1 Arquitectura do edifício

A escolha do edifício foi feita considerando os objectivos da dissertação. O projecto solicitado seria em simultâneo um fogo intermédio, em um edifício habitacional com uma arquitectura simplificada. A Figura 3.1 representa a planta do fogo estudado, com as seguintes características: tipologia T4, segundo andar de um edifício de quatro andares. Adjacente à fachada Este existe outro edifício similar. Inicialmente o projecto seleccionado para estudo, apresentava uma geometria com algumas reentrâncias e com elementos de sombreamento horizontais e verticais em todas as fachadas. Foi feita a simplificação de todo o projecto, com a homogeneização da geometria, adquirindo assim uma arquitetura geométrica rectangular. Foram retirados os elementos de sombreamento e calculados de novo, apenas para a fachada Sul.

A geometria do edifício é definida por:

- Planta= 12,30 x 13,10 [m]
- Área do fogo= 120 [m<sup>2</sup>]
- Pé direito= 3 [m]

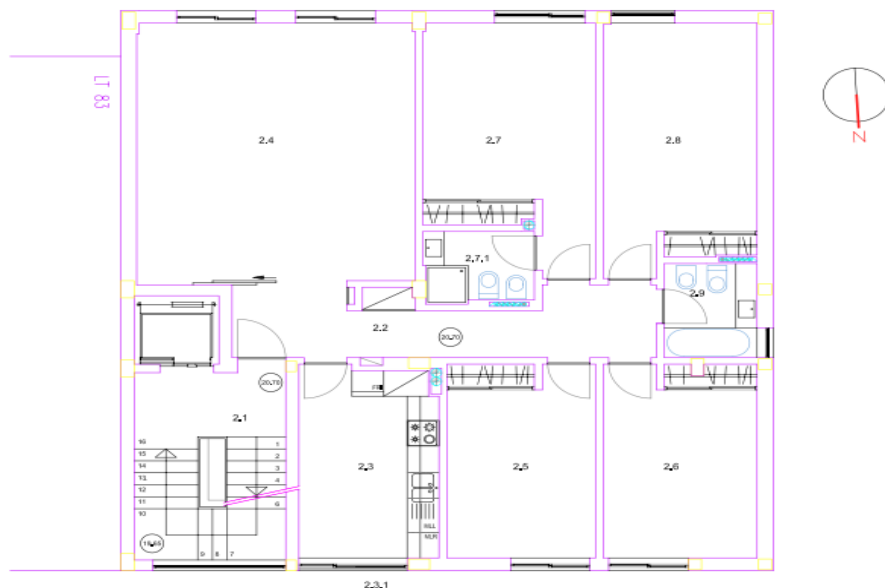


Figura 3.1- Planta do projecto em estudo.

A orientação dos vãos envidraçados na fracção autónoma é predominante nas orientações Norte e Sul, existindo uma pequena janela no quadrante Oeste. A Tabela 3.1 mostra a relação entre as áreas das envolventes exteriores e dos vãos envidraçados.

Tabela 3.1- Áreas dos elementos opacos, vãos envidraçados em m<sup>2</sup> e percentagem de envidraçados.

	Norte	Sul	Este	Oeste
<b>Área total envolvente exterior</b>	25	33	2	36
<b>Área total envidraçados</b>	7	9	0	1
<b>Percentagem de envidraçados</b>	29%	27%	0	3%

A Tabela 3.2 indica as áreas totais em m<sup>2</sup> das envolventes exteriores, janelas, pontes térmicas planas (ptp), zona corrente (zc), pavimento e a percentagem de vãos envidraçados, face ao pavimento do compartimento que representam.

Tabela 3.2- Áreas dos elementos das fachadas, pavimentos e percentagem de vãos envidraçados em relação ao pavimento.

Elemento	Área total	Área janela	Área ptp	Área zc	Área Pavimento	% Vãos envidraçados
sala_2.4 S	15	5	1	10	32	14
sala_2.4 E	2	0	1	2		
Cozinha_2.3 N	8	4	2	2	12	38
Suite_2.7 S	10	3	1	6	16	16
IS_2.9 W	7	1	1	4	4	32
Quarto_2.6 W	14	0	1	12	13	12
Quarto_2.6 N	9	2	1	6		
Quarto_2.5 N	8	2	1	6	13	12
Quarto_2.8 S	8	2	1	5	16	11
Quarto_2.8 W	16	0	1	15		

### 3.1.2 Elementos de sombreamento

A orientação do edifício tem influência na análise térmica dos edifícios, em particular em regime de Verão onde o efeito da radiação solar é significativamente mais relevante. A radiação solar, mesmo em condições de temperatura baixa, provoca um aquecimento sobre as superfícies que incide. É importante avaliar os fenómenos envolvidos, em especial para os casos correntes das superfícies opacas e transparentes [2].

A geometria de insolação influencia os resultados do sol sobre os edifícios, na minimização do seu efeito em períodos de Verão e no seu aproveitamento para ganhos passivos em regime de Inverno. Os movimentos da Terra, em específico a rotação que origina a sequência dia-noite e a translação à volta do sol, da qual resulta as várias estações do ano, influenciam a incidência solar [2].

Devido às variações da altura solar ao longo do ano, é possível a utilização de palas de sombreamento no exterior do edifício, que possibilitem o aproveitamento solar no Inverno e que atenuem os seus efeitos no Verão. O quadrante Norte não recebe incidência solar directa e nos quadrantes Este e Oeste, devido aos movimentos do sol, é ineficaz a utilização de palas; logo, apenas foram projectadas palas solares para os vãos envidraçados orientados a Sul [2].

Neste estudo, foram calculadas palas de sombreamento horizontais, com o objectivo de, até 1 de Março, os vãos envidraçados receberem a totalidade de radiação solar e a 1 de Junho estejam totalmente sombreados. A escolha dos meses foi feita com base nos pressupostos da regulamentação térmica que assume quatro meses de estação de arrefecimento, iniciando-se a 1 de Junho. As regiões escolhidas foram as cidades de Bragança, Coimbra e Lisboa (vd 3.2.1).

As palas projectadas são perpendiculares à parede exterior do edifício. Tendo a parede um azimuth de  $\Phi_P$  e o sol um azimuth  $\Phi_S$ , então o azimuth do Sol em relação à parede será a diferença  $\Delta\Phi = \Phi_S - \Phi_P$ . Sendo  $z$  a largura, tem-se

$$y = z \times \operatorname{tg} \Delta\Phi \quad (3.1)$$

e com o ângulo zenital do sol,  $\theta_s$

$$y = z \times \frac{\cot g \theta_s}{\cot g \Delta\Phi} \quad (3.2)$$

É assim possível, com base na equação (3.2), calcular os valores máximos e mínimos de  $y$  para os meses requeridos, como exemplificados na Figura 3.2.

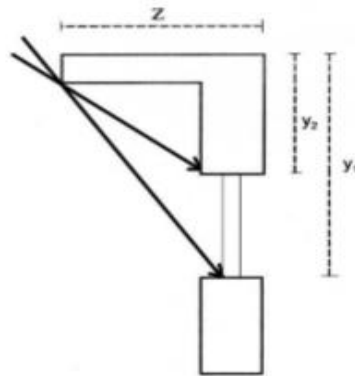


Figura 3.2- Dimensionamento da pala de sombreamento (Fonte: [2]).

Considerando a altura máxima do sol ao meio dia, o ângulo zenital pode ser calculado por:

$$\theta_s = \lambda - \delta \quad (3.3)$$

Sendo  $\lambda$  a latitude do lugar onde o projecto está inserido e  $\delta$  o ângulo definido pelo plano que une o sol ao centro da terra com o equador, designado por *declinação*. A *declinação*  $\delta$  é definida pela equação (3.4).

$$\text{sen} \delta = -\text{sen} 23,45 \times \cos \frac{360 \times (n+10)}{365,25} \quad (3.4)$$

Onde 360 é o valor de uma rotação completa em graus, 365,25 a duração de um ano em dias e  $n$  o dia no ano numa escala de 1 a 365. O valor 23,45 é expresso em graus, sendo igual à inclinação em relação à normal do plano do movimento de translação que a terra faz em relação a um eixo. As palas estão inseridas nas paredes orientadas ao quadrante sul e considerando o cálculo para o meio-dia solar,  $\Phi_p = 0$  e  $\Phi_s = 0$ . Assim, a equação (3.2) pode ser simplificada, tomando a forma da equação (3.5).

$$y = z \times \cot g(\lambda - \delta) \quad (3.5)$$

O objectivo é saber a que altura a pala tem que ser inserida em relação ao topo do vão envidraçado e qual o seu comprimento, para conseguir responder aos sombreamentos requeridos para as duas datas definidas. Substituindo a altura total da janela,  $y_1 - y_2 = h$ , ver Figura 3.2, na equação (3.6) e substituindo as latitudes de cada região e a *declinação*  $\delta$  dos dias pretendidos como máximo e mínimo de sombreamento, obtém-se a largura da pala,  $z$ .

$$z = \frac{h}{\cot g(\lambda - \delta_{\text{Março}}) - \cot g(\lambda - \delta_{\text{Junho}})} \quad (3.6)$$

Com a largura calculada, é possível definir a altura a que a pala deve estar por cima do vão envidraçado substituindo  $z$  na equação (3.5) [2]. A Tabela 3.3 apresenta os resultados obtidos para cada cidade.

Tabela 3.3- Medidas das palas de sombreamento.

Região	$\lambda$ (°)	y (m)	z (m)
<b>Bragança</b>	41,8	1,1	1,2
<b>Coimbra</b>	40,2	1	1,1
<b>Lisboa</b>	38,7	1	0,9

Outra temática relevante sobre os vãos envidraçados, são os dispositivos de sombreamento reguláveis, os pára-sol. Estes podem ser introduzidos pelo interior ou pelo exterior dos envidraçados, sendo comum a sua utilização pelo exterior. Os dois métodos têm eficiências diferentes face ao comportamento térmico do edifício. Quando introduzidos pelo exterior, os pára-sol podem ser opacos, não havendo transmissão de radiação visível para o interior da habitação. Este caso verifica-se quando as portadas ou estores estão permanentemente activas. Além da inexistência de transmissão, o coeficiente de absorção do elemento será baixo, devido a ventilação em geral forte no espaço de ar entre o elemento e o envidraçado. O mesmo fenómeno não acontece em relação a proteções interiores, onde a eficiência diminui. A radiação que atravessa o envidraçado atinge directamente a protecção interior. Uma parte da radiação pode ser reflectida imediatamente através do envidraçado sob forma de luz visível, outra parcela poderá atravessar os pára-sol, se este for transparente, sendo absorvida pelos elementos interiores constituintes da habitação. A maior parte da energia é absorvida pela protecção, aumentando assim a sua temperatura. A face oposta em relação ao envidraçado aquece por efeito de condução, iniciando trocas por radiação e convecção para o ambiente interior. A face exposta à radiação, liberta calor para o espaço de ar, entre ela e o envidraçado, e consequentemente, para o ambiente interior. A mesma face liberta radiação, outrora absorvida em forma de radiação infravermelha. Esta não é transparente ao envidraçado e vai

ser absorvida por este, aquecendo e libertando calor para o ambiente interior. Similarmente, o mesmo fenómeno acontece com os elementos interiores da habitação, levando a um aumento da temperatura interior [2].

O primeiro exemplo, pára-sol pelo exterior, favorece mais as habitações no Verão e o segundo exemplo, pára-sol pelo interior, no Inverno. Como referido anteriormente, a exposição do edifício à radiação solar é mais gravosa na estação de Verão. Assim, no projecto optou-se por inserir os dispositivos de sombreamento reguláveis pelo exterior.

Os factores descritos anteriormente, palas de sombreamento horizontais e pára-sol, foram introduzidos em todas as soluções estudadas de igual forma, pois as suas utilizações em edifícios habitacionais são visíveis desde a entrada da primeira regulamentação.

A inserção do parque habitacional nas duas ferramentas de cálculo também foi feita, porque tanto os edifícios como as árvores são objectos de sombreamento, interferindo na radiação solar que as fachadas do edifício possam receber.

### **3.1.3 Soluções construtivas**

A escolha dos materiais constituintes e características dimensionais das envolventes do edifício, do pavimento e dos vãos envidraçados, foi feita com base na pesquisa recolhida sobre o desenvolvimento das soluções construtivas, com a implementação e evolução dos regulamentos ao longo dos anos (vd capítulo 2.2). Após uma primeira triagem de soluções, estas foram inseridas na folha de cálculo do REH 2013 [31] com as atualizações do REH 2016 [12] e ajustadas para cumprir a regulamentação.

As características físicas de cada material foram retiradas do ITE50 [32], da EN ISO 10456-2007 [33] e documentos de apoio do programa de simulação *EnergyPlus*. A representação é feita na Tabela 3.4, Tabela 3.5, Tabela 3.6 e Tabela 3.7 seguindo a ordem da evolução da regulamentação.

Tabela 3.4- Características físicas e geométricas dos materiais constituintes das soluções construtivas adoptadas, RCCTE1990.

RCCTE 1990	Material	e (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	R ( m².°C/W)	Rt ( m².°C/W)	U (W/m².°C)	$\rho$ (Kg/m³)	Cp (J/Kg.K)
Parede contacto exterior (zc)	Reboco	0,02	1,3	0,02	1,58	0,63	1800	837
	Alvenaria 15	0,15	-	0,39			1200	837
	Ar	0,03	-	0,18			-	-
	EPS	0,02	0,037	0,54			-	-
	Alvenaria 11	0,11	-	0,27			1200	837
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Parede contacto exterior (ptp)	Reboco	0,02	1,3	0,02	0,33	3,07	1800	837
	Betão armado	0,25	2	0,13			2300	880
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Pavimento	Ladrilho cerâmico	0,01	1,3	0,01	0,44	2,27	2300	840
	Betonilha	0,1	0,85	0,12			1300	1000
	Betão armado	0,2	2	0,1			2300	880
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Parede interior (zc)	Reboco	0,02	1,3	0,02	0,56	1,78	1800	837
	Alvenaria 11	0,11	-	0,27			1200	837
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Parede interior (ptp)	Reboco	0,02	1,3	0,02	0,42	2,41	1800	837
	Betão armado	0,25	2	0,13			2300	880
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Parede divisória FA/CC (zc)	Reboco	0,02	1,3	0,02	0,56	1,78	1800	837
	Alvenaria 11	0,11	-	0,27			1200	837
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Parede divisória FA/CC (ptp)	Reboco	0,02	1,3	0,02	0,42	2,41	1800	837
	Betão armado	0,25	2	0,13			2300	880
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Envidraçado	Vidro	0,006	0,9	0,007	0,18	5,6	-	-



Tabela 3.5- Características físicas e geométricas dos materiais constituintes das soluções construtivas adoptadas, RCCTE 2006.

RCCTE 2006	Material	e (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	R ( m².°C/W)	Rt ( m².°C/W)	U (W/m².°C)	$\rho$ (Kg/m³)	Cp (J/Kg.K)
Parede contacto exterior (zc)	Reboco	0,02	1,3	0,02	1,58	0,63	1800	837
	Alvenaria 15	0,15	-	0,39			1200	837
	Ar	0,03	-	0,18			-	-
	EPS	0,02	0,037	0,54			-	-
	Alvenaria 11	0,11	-	0,27			1200	837
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Parede contacto exterior (ptp)	Reboco	0,02	1,3	0,02	0,87	1,15	1800	837
	Betão armado	0,25	2	0,13			2300	880
	EPS	0,02	0,037	0,54			-	-
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Pavimento	Piso flutuante	0,01	0,015	0,67	1,32	0,76	500	1200
	ICB	0,01	0,045	0,22			-	-
	Betonilha	0,1	0,85	0,12			1300	1000
	Betão armado	0,2	2	0,1			2300	880
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Parede interior (zc)	Reboco	0,02	1,3	0,02	0,56	1,78	1800	837
	Alvenaria 11	0,11	-	0,27			1200	837
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Parede interior (ptp)	Reboco	0,02	1,3	0,02	0,42	2,41	1800	837
	Betão armado	0,25	2	0,13			2300	880
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Parede divisória FA/CC (zc)	Reboco	0,02	1,3	0,02	1,83	0,55	1800	837
	Alvenaria 11	0,11	-	0,27			1200	837
	Lã de rocha	0,04	0,04	1			-	-
	Alvenaria 11	0,11	-	0,27			1200	837
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Parede divisória FA/CC (ptp)	Reboco	0,02	1,3	0,02	1,23	0,82	1800	837
	Betão armado	0,25	2	0,13			2300	880
	EPS	0,03	0,037	0,81			-	-
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Envidraçado	Vidro	0,006	0,9	0,007	0,36	2,7	-	-
	Ar	0,0014	-	0,17			-	-
	Vidro	0,006	0,9	0,007			-	-

Tabela 3.6- Características físicas e geométricas dos materiais constituintes das soluções construtivas adoptadas, REH 2013.

REH 2013	Material	e (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	R ( m².°C/W)	Rt ( m².°C/W)	U (W/m².°C)	$\rho$ (Kg/m³)	Cp (J/Kg.K)
Parede contacto exterior (zc)	Argamassa msita	0,02	1,3	0,02	1,79	0,56	1600	837
	EPS	0,04	0,037	1,08			-	-
	Alvenaria 22	0,22	-	0,52			1200	837
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Parede contacto exterior (ptp)	Argamassa msita	0,02	1,3	0,02	1,39	0,72	1600	837
	EPS	0,04	0,037	1,08			-	-
	Betão armado	0,25	2	0,13			2300	880
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Pavimento	Piso flutuante	0,01	0,015	0,67	1,32	0,76	500	1200
	ICB	0,01	0,045	0,22			-	-
	Betonilha	0,1	0,85	0,12			1300	1000
	Betão armado	0,2	2	0,1			2300	880
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Parede interior (zc)	Reboco	0,02	1,3	0,02	0,56	1,78	1800	837
	Alvenaria 11	0,11	-	0,27			1200	837
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Parede interior (ptp)	Reboco	0,02	1,3	0,02	0,42	2,41	1800	837
	Betão armado	0,25	2	0,13			2300	880
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Parede divisória FA/CC (zc)	Reboco	0,02	1,3	0,02	1,83	0,55	1800	837
	Alvenaria 11	0,11	-	0,27			1200	837
	Lã de rocha	0,04	0,04	1			-	-
	Alvenaria 11	0,11	-	0,27			1200	837
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Parede divisória FA/CC (ptp)	Reboco	0,02	1,3	0,02	1,23	0,82	1800	837
	Betão armado	0,25	2	0,13			2300	880
	XPS	0,03	0,037	0,81			-	-
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Envidraçado	Vidro	0,006	0,9	0,007	0,36	2,7	-	-
	Ar	0,0014	-	0,17			-	-
	Vidro	0,006	0,9	0,007			-	-

Tabela 3.7- Características físicas e geométricas dos materiais constituintes das soluções construtivas adoptadas, REH 2016.

REH 2016	Material	e (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	R ( m².°C/W)	Rt ( m².°C/W)	U (W/m².°C)	$\rho$ (Kg/m³)	Cp (J/Kg.K)
Parede contacto exterior (zc)	Argamassa msita	0,02	1,3	0,02	2,87	0,35	1600	837
	EPS	0,08	0,037	2,16			-	-
	Alvenaria 22	0,22	-	0,52			1200	837
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Parede contacto exterior (ptp)	Argamassa msita	0,02	1,3	0,02	2,47	0,4	1600	837
	EPS	0,08	0,037	2,16			-	-
	Betão armado	0,25	2	0,13			2300	880
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Pavimento	Piso flutuante	0,01	0,015	0,67	1,32	0,76	500	1200
	ICB	0,01	0,045	0,22			-	-
	Betonilha	0,1	0,85	0,12			1300	1000
	Betão armado	0,2	2	0,1			2300	880
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Parede interior (zc)	Alvenaria 11	0,11	-	0,27	0,56	1,78	1200	837
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Parede interior (ptp)	Betão armado	0,25	2	0,13	0,42	2,41	2300	880
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Parede divisória FA/CC (zc)	Reboco	0,02	1,3	0,02	1,83	0,55	1800	837
	Alvenaria 11	0,11	-	0,27			1200	837
	Lã de rocha	0,04	0,04	1			-	-
	Alvenaria 11	0,11	-	0,27			1200	837
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Parede divisória FA/CC (ptp)	Reboco	0,02	1,3	0,02	1,23	0,82	1800	837
	Betão armado	0,25	2	0,13			2300	880
	XPS	0,03	0,037	0,81			-	-
	Reboco	0,02	1,3	0,02			1800	837
Envidraçado	Vidro	0,006	0,9	0,007	0,42	2,4	-	-
	Argon	0,0014	-	0,24			-	-
	Vidro	0,006	0,9	0,007			-	-

## 3.2 Caracterização climática

No estudo, pretendia-se variar os três tipos de zonamento climáticos existentes em Portugal. Contudo não foi possível variar as três subdivisões de cada estação como inicialmente era previsto, devido aos ficheiros climáticos existentes na ferramenta de simulação *EnergyPlus*. Para conseguir comparar resultados em ambas as ferramentas, foram utilizadas as mesmas regiões nos dois tipos de cálculo. Assim, de maneira a conseguir variar o máximo possível o tipo de zona, foram escolhidas as cidades de Bragança, Coimbra e Lisboa. De seguida, são apresentados os parâmetros climáticos utilizados para o cálculo das necessidades energéticas do edifício, em cada região.

### 3.2.1.1 Bragança

Tabela 3.8- Valor de referência e declives para ajustes em altitude para a estação de aquecimento, Bragança. (Fonte: Adaptado [13]).

Inverno-Bragança										
z	z ref	GD ref		GD	Zona	M		$\theta_{ext,i}$		G sul
(m)	(m)	(°C)	a (°C/m)	(°C)	-	(meses)	a (mes/km)	(°C)	(°C/km)	(kWh/m2)
674	680	2015	1,4	2006,6	I3	7,3	0	5,5	-4	125

Tabela 3.9- Valor de referência e declives para ajustes em altitude para a estação convencional de arrefecimento, Bragança. (Fonte: Adaptado [13]).

Verão-Bragança														
z	z ref	$\theta_{ext,v}$		$\theta_{ext,v}$	Zona	I sol								
(m)	(m)	(°C)	(°C/km)	(°C)	-	(kWh/m2)								
674	680	21,5	-7	21,5	V2	0°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°
						N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
						790	220	345	480	485	425	485	480	345

### 3.2.1.2 Coimbra

Tabela 3.10- Valor de referência e declives para ajustes em altitude para a estação de aquecimento, Coimbra. (Fonte: Adaptado [13]).

Inverno-Coimbra										
z	z ref	GD ref		GD	Zona	M		$\theta_{ext,i}$		G sul
(m)	(m)	(°C)	a (°C/m)	(°C)	-	(meses)	a (mes/km)	(°C)	(°C/km)	(kWh/m2)
104	67	1304	1	1341	I2	6,3	0	9,7	-5	140

Tabela 3.11- Valor de referência e declives para ajustes em altitude para a estação convencional de arrefecimento, Coimbra. (Fonte: Adaptado [13]).

Verão-Coimbra													
z	z ref	$\theta_{ext,v}$		$\theta_{ext,v}$	Zona	I sol							
(m)	(m)	(°C)	(°C/km)	(°C)	-	(kWh/m <sup>2</sup> )							
104	67	20,9	0	20,9	V2	0°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°
						825	225	360	495	495	420	495	360

### 3.2.1.3 Lisboa

Tabela 3.12- Valor de referência e declives para ajustes em altitude para a estação de aquecimento, Lisboa. (Fonte: Adaptado [13]).

Inverno-Lisboa										
z	z ref	GD ref		GD	Zona	M		$\theta_{ext,i}$		G sul
(m)	(m)	(°C)	a (°C/m)	(°C)	-	(meses)	a (mes/km)	(°C)	(°C/km)	(kWh/m <sup>2</sup> )
52	109	1071	1,7	974,1	I1	5,3	3	10,8	-4	150

Tabela 3.13- Valor de referência e declives para ajustes em altitude para a estação convencional de arrefecimento, Lisboa. (Fonte: Adaptado [13]).

Verão-Lisboa													
z	z ref	$\theta_{ext,v}$		$\theta_{ext,v}$	Zona	I sol							
(m)	(m)	(°C)	(°C/km)	(°C)	-	(kWh/m <sup>2</sup> )							
52	109	21,7	-10	22,3	V3	0°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°
						840	225	365	500	495	410	495	365

## 3.3 Metodologia utilizada para obtenção de resultados

A regulamentação térmica portuguesa foi introduzida no âmbito das preocupações para melhoria dos métodos construtivos com influência nos consumos energéticos e no conforto térmico. Assim, surgiram requisitos mínimos de qualidade térmica dos elementos construtivos e foram propostos valores máximos de necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento, calculados com base em valores mínimos de conforto. É assumido no cálculo, que, embora todos os fenómenos de transmissão de calor sejam de natureza não-estacionária, as necessidades energéticas para fins de aquecimento e arrefecimento são estimadas admitindo que o edifício se encontra em regime de funcionamento permanente. A base de cálculo das necessidades energéticas é, portanto, feita pela integração de equações de perdas e ganhos instantâneos de calor, no intervalo de tempo correspondente [14]. Como os pressupostos apresentados na regulamentação, na forma de simplificação, nem sempre são os reais, os resultados obtidos devem ser encarados, apenas como um meio de comparação e de validação.

No presente estudo, as alterações introduzidas pelas revisões regulamentares desde a entrada em vigor do primeiro regulamento em 1990 até a publicação do regulamento actualmente em vigor em 2013, foram contabilizadas através da quantificação das necessidades de energia útil

para aquecimento e arrefecimento e da estimativa das condições de conforto. A quantificação das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento foi realizada com recurso a uma folha de cálculo associada à regulamentação actualmente em vigor (REH) e com recurso a uma ferramenta de simulação detalhada de comportamento energético de edifícios (*EnergyPlus*). Esta última ferramenta também foi utilizada na estimativa das condições de conforto.

Assim, foram escolhidos elementos construtivos (envolvente, vãos envidraçados e pormenores arquitetónicos) típicos de cada período de tempo correspondente a cada regulamento, para serem inseridos na folha de cálculo proposta pelo regulamento térmico em vigor [12] [31]. É importante salientar que, para cada tipo de solução, foram respeitadas as exigências regulamentares da respetiva época em termos das necessidades máximas de energia para aquecimento e arrefecimento, quer nos valores de cálculo, quer nos valores de referência.

Como referido anteriormente, a folha de cálculo assenta numa metodologia de cálculo que admite o edifício em regime de funcionamento permanente. Por este motivo, para estimar com maior precisão o comportamento térmico do edifício em estudo, optou-se por analisar a influência das alterações introduzidas pelas revisões regulamentares também com a ferramenta de simulação *EnergyPlus*.

Os respetivos factores e coeficientes utilizados para o cálculo das necessidades de energia e necessidades de energia de referência foram retirados dos regulamentos respetivos. Foi necessário para este cálculo o Decreto-Lei nº40/90 [3], Decreto-Lei nº80/2006 [9], Decreto-Lei nº118/2013 [11], Despachos 15793-2013 [13], Portaria nº 349-B/2013 [34], Portaria nº 349-C/2013 [31] e Portaria nº379-A/2015 [12]. A escolha de cada valor foi feita respeitando as considerações explicitadas no subcapítulo 3.1.

Foram analisados em separado, os períodos de aquecimento e de arrefecimento, devido à necessidade em captar em pormenor as alterações introduzidas em cada estação pela análise de sensibilidade proposta, bem como o panorama anual. Os valores de referência para ambas as estações, apenas serviram para comprovar as soluções do estudo.

É de salientar que os aspectos relacionados com as energias renováveis ou a qualidade dos equipamentos de climatização, que afectam sobretudo o cálculo das necessidades de energia primária e a classificação energética do edifício, foram desprezados.

As condições de conforto térmico foram analisadas através de frequência acumulada e de um modelo adaptativo (vd 2.5.2 e 2.5.3). Para esta análise é preciso dispor de valores de temperatura exterior e interior e de temperatura interior operativa, que foram conseguidos através da ferramenta de simulação *EnergyPlus*.

### **3.4 *Energy plus***

#### **3.4.1 Descrição Geral**

*EnergyPlus* é uma ferramenta de simulação dinâmica que, através da introdução de variáveis de entrada (geometria do edifício, soluções construtivas, sistemas de aquecimento e arrefecimento, condições exteriores, cargas de equipamentos, pessoas, iluminação e outros), permite ao utilizador avaliar o comportamento térmico de um edifício de uma forma realista. Esta ferramenta baseia-se na simulação integrada de vários módulos, como as variáveis de entrada referidas anteriormente, que são simulados em simultâneo. Assim são obtidos valores de saída dependentes das condições definidas (interiores e exteriores).

Como referido anteriormente, recorreu-se a esta metodologia de cálculo como forma de comparação de resultados obtidos através da aplicação da folha de cálculo regulamentar.

### 3.4.2 Validação do modelo de simulação dinâmica

Esta secção tem como objectivo a descrição da validação do modelo introduzido no programa *EnergyPlus* com base em resultados de estudos publicados na literatura. «*Best test*» [35] representa uma compilação de estudos realizados com o objectivo de validar o *Energyplus* com outros programas de simulação dinâmica. Os casos são designados como casos 195 a 960 e representam os padrões de teste para avaliação de programas da ANSI/ASHRAE140-2007 [35].

O documento utiliza, para efeitos de modelação, os algoritmos utilizados pela ANSI/ASHRAE 140-2007[35], descritos abaixo:

#### Algoritmo de convecção interior e exterior

- Configurações opcionais:
  1. SurfaceConvectionAlgorithm:Inside = Simple
  2. SurfaceConvectionAlgorithm:Inside = TARP
  3. SurfaceConvectionAlgorithm:Inside = Ceiling Diffuser
  4. SurfaceConvectionAlgorithm:Inside=AdaptiveConvectionAlgorithm
  5. SurfaceConvectionAlgorithm:Outside = SimpleCombined
  6. SurfaceConvectionAlgorithm:Outside = TARP
  7. SurfaceConvectionAlgorithm:Outside = MoWitt
  8. SurfaceConvectionAlgorithm:Outside = DOE-2
  9. SurfaceConvectionAlgorithm:Outside = AdaptiveConvectionAlgorithm
- Configuração utilizada:
  1. SurfaceConvectionAlgorithm:Inside = TARP
  2. SurfaceConvectionAlgorithm:Outside = DOE-2

#### Efeitos de distribuição solar para superfícies de sombra

- Configurações opcionais:
  1. SOLAR DISTRIBUTION = MinimalShadowing
  2. SOLAR DISTRIBUTION = FullExterior
  3. SOLAR DISTRIBUTION = FullInteriorAndExterior
  4. SOLAR DISTRIBUTION = FullExteriorWithReflections
  5. SOLAR DISTRIBUTION = FullInteriorAndExteriorWithReflections
- Configuração utilizada:
- SOLAR DISTRIBUTION = FullInteriorAndExterior.

### **Cálculo da temperatura resultante da zona**

- Configurações opcionais:
  1. ZoneCapacitanceMultiplier:ResearchSpecial:Temperature capacity Multiplier > 0,
  2. ZoneCapacitanceMultiplier:ResearchSpecial:Humidity Capacity Multiplier > 0,
  3. ZoneCapacitanceMultiplier:ResearchSpecial:Carbon Dioxide Capacity Multiplier >0
- Configurações utilizadas:
  1. ZoneCapacitanceMultiplier:ResearchSpecial:Temperature capacity Multiplier =1,
  2. ZoneCapacitanceMultiplier:ResearchSpecial:Humidity Capacity Multiplier =1,
  3. ZoneCapacitanceMultiplier:ResearchSpecial:Carbon Dioxide Capacity Multiplier =1

### **Variáveis usadas para descrever as propriedades das superfícies**

- Configurações opcionais:
  1. Visible Absorptance = 0.0 to 1.0
- Configuração utilizada:
  1. Visible Absorptance = Solar Absorptance = 0.6

### **Incremento de tempo de simulação**

- Configurações opcionais:
  1. TimeStep = whole number between 1 and 60 evenly divisible into 60
- Configuração utilizada:
  1. TimeStep = 4

### **Frequência dos cálculos solar e sombra**

- Configurações opcionais:
  1. ShadowCalculation >= 1
- Configuração utilizada:
  1. ShadowCalculation = 1

O documento apresenta vários exemplos de edifícios, com diferentes soluções construtivas e diferentes disposições arquitetônicas. Efetuou-se a validação para os casos C600, C610, C900 e C910. O primeiro caso é um edifício de construção leve, traduzido por pouca inércia térmica, com os vãos envidraçados virados a sul. O segundo é idêntico ao primeiro; contudo



são acrescentadas palas de sombreamento aos vãos envidraçados. O terceiro e quarto caso são geometricamente iguais aos dois primeiros, correspondendo C600 a C900 e C610 a C910, mas, em vez de recorrerem a uma construção leve, recorrem a elementos estruturais de massa mais elevada.

Na sequência da simulação destes casos e da comparação com os resultados do presente estudo, com base nos algoritmos e pressupostos indicados, conclui-se que os valores apresentam uma aproximação aceitável. Apresenta-se na Tabela 3.14, Tabela 3.15, Tabela 3.16 e Tabela 3.17 os resultados obtidos na sequência desta análise:

Tabela 3.14- Validação do modelo de simulação dinâmica, C600.

<b>C600</b>	<b>Aquecimento (MWh)</b>	<b>Arrefecimento (MWh)</b>
<b>Best test</b>	4,5	7
<b>Modelo trabalho</b>	4,9	6,4

Tabela 3.15- Validação do modelo de simulação dinâmica, C610.

<b>C610</b>	<b>Aquecimento (MWh)</b>	<b>Arrefecimento (MWh)</b>
<b>Best test</b>	4,5	5
<b>Modelo trabalho</b>	5	4,5

Tabela 3.16- Validação do modelo de simulação dinâmica, C900.

<b>C900</b>	<b>Aquecimento (MWh)</b>	<b>Arrefecimento (MWh)</b>
<b>Best test</b>	1,2	2,6
<b>Modelo trabalho</b>	2,4	2,7

Tabela 3.17- Validação do modelo de simulação dinâmica, C910.

<b>C910</b>	<b>Aquecimento (MWh)</b>	<b>Arrefecimento (MWh)</b>
<b>Best test</b>	1,5	1,4
<b>Modelo trabalho</b>	2,7	1,4

Como se pode constatar a partir das tabelas acima, o modelo de simulação do presente trabalho tende a sobreestimar as necessidades de aquecimento e subestimar as necessidades de arrefecimento. Conclui-se ainda que as diferenças entre os modelos são sempre constantes, podendo estas ser resultantes da diferença de versão utilizada nos dois modelos. Foi utilizado para efetuar o teste a versão 8.6, por ser a ultima versão existente, apos o início do estudo, mas no documento *Best test* a versão utilizada foi a 6.0.

### 3.4.3 Descrição do modelo utilizado na simulação dinâmica

Neste subcapítulo são descritas as opções tomadas e os pressupostos assumidos na análise de simulação dinâmica, feita com recurso ao *software Energy Plus*.

### 3.4.3.1 Algoritmos de cálculo

Como o *software* contempla uma lista de algoritmos de cálculo para a análise do comportamento térmico dos edifícios, o utilizador deve escolher qual o algoritmo que se adapta melhor às suas necessidades. Os algoritmos implementados neste caso foram descritos na secção 3.3.2. Além disso, optou-se por um período de frequência de simulação de 10 em 10 minutos. As Figuras 3.3 a 3.13 apresentam uma síntese das opções tomadas.

#### **Version**

Field	Units	Obj1
Version Identifier		8.6

Figura 3.3- Algoritmo de cálculo *EnergyPlus- Version*.

#### **Simulation control**

Field	Units	Obj1
Do Zone Sizing Calculation		No
Do System Sizing Calculation		No
Do Plant Sizing Calculation		No
Run Simulation for Sizing Periods		No
Run Simulation for Weather File Run Periods		Yes
Do HVAC Sizing Simulation for Sizing Periods		No
Maximum Number of HVAC Sizing Simulation Passes		1

Figura 3.4- Algoritmo de cálculo *EnergyPlus- Simulation control*.

#### **Building**

O campo *Building* descreve os parâmetros que são usados durante a simulação do edifício[25]. A Figura 3.5 é referente aos modelos utilizados para as cidades de Bragança e Coimbra e a Figura 3.6 refere-se aos modelos utilizados para a cidade de Lisboa.

Field	Units	Obj1
Name		FA
North Axis	deg	180
Terrain		City
Loads Convergence Tolerance Value		0,05
Temperature Convergence Tolerance Value	deltaC	0,5
Solar Distribution		FullInteriorAndExterior
Maximum Number of Warmup Days		25
Minimum Number of Warmup Days		6

Figura 3.5- Algoritmo de cálculo *EnergyPlus- Building* referente a Bragança e Coimbra.

Field	Units	Obj1
Name		FA
North Axis	deg	180
Terrain		Ocean
Loads Convergence Tolerance Value		0,05
Temperature Convergence Tolerance Value	deltaC	0,5
Solar Distribution		FullInteriorAndExterior
Maximum Number of Warmup Days		25
Minimum Number of Warmup Days		6

Figura 3.6- Algoritmo de cálculo *EnergyPlus- Building* referente a Lisboa.

### **Shadow Calculation**

Este campo é usado para controlar os modelos de radiação solar, sombreamento e iluminação natural. A opção *AverageOverDaysInFrequency* é usada para controlar o modo como o modelo solar, sombreamento e iluminação natural são calculados em relação ao tempo de cálculo durante a simulação. Neste caso, a frequência de cálculo das sombras é de um dia. Esta opção foi tomada devido a recomendação da norma ANSI/ASHRAE 140-2007 [35]. Apresenta-se na Figura 3.7 a síntese das opções tomadas para o campo *Shadow Calculation*.

Field	Units	Obj1
Calculation Method		AverageOverDaysInFrequency
Calculation Frequency		1
Maximum Figures in Shadow Overlap Calculations		15000
Polygon Clipping Algorithm		SutherlandHodgman
Sky Diffuse Modeling Algorithm		SimpleSkyDiffuseModeling

Figura 3.7- Algoritmo de cálculo *EnergyPlus- Shadow Calculation*.

### **Surface Convection Algorithm: Inside**

Field	Units	Obj1
Algorithm		TARP

Figura 3.8- Algoritmo de cálculo *EnergyPlus- Surface Convection Algorithm : Inside*.

### **Surface Convection Algorithm: Outside**

Field	Units	Obj1
Algorithm		DOE-2

Figura 3.9- Algoritmo de cálculo *EnergyPlus- Surface Convection Algorithm : Outside*.

### **Heat Balance Algorithm**

Field	Units	Obj1
Algorithm		ConductionTransferFunction
Surface Temperature Upper Limit	C	200
Minimum Surface Convection Heat Transfer Coefficient Value	W/m2-K	0,1
Maximum Surface Convection Heat Transfer Coefficient Value	W/m2-K	1000

Figura 3.10- Algoritmo de cálculo *EnergyPlus- Heat Balance Algorithm*

#### **Zone Capacitance Multiplier: Research Special**

Field	Units	Obj1
Temperature Capacity Multiplier		1
Humidity Capacity Multiplier		1
Carbon Dioxide Capacity Multiplier		1
Generic Contaminant Capacity Multiplier		1

Figura 3.11- Algoritmo de cálculo *EnergyPlus- Zone Capacitance Multiplier: Research Special*.

#### **Time Step**

Field	Units	Obj1
Number of Timesteps per Hour		6

Figura 3.12- Algoritmo de cálculo *EnergyPlus- Time Step*.

#### **Run period**

O objecto *Run period* serve para incrementar o período de tempo que o utilizador pretende na simulação. Neste caso optou-se por um período de simulação de um ano.

Field	Units	Obj1
Name		Período de simulação
Begin Month		1
Begin Day of Month		1
End Month		12
End Day of Month		31
Day of Week for Start Day		UseWeatherFile
Use Weather File Holidays and Special Days		Yes
Use Weather File Daylight Saving Period		Yes
Apply Weekend Holiday Rule		No
Use Weather File Rain Indicators		Yes
Use Weather File Snow Indicators		Yes
Number of Times Runperiod to be Repeated		1
Increment Day of Week on repeat		Yes
Start Year		

Figura 3.13- Algoritmo de cálculo *EnergyPlus- Run period*.

### **3.4.3.2 Geometria do edifício**

As características geométricas referentes a envoltantes opacas exteriores e interiores são inseridas no campo *Building Surface:Detailed*. A sua introdução é feita através de coordenadas

cartesianas, representadas pelos três eixos principais, x, y, z. Com recurso a estas coordenadas, são definidas as fronteiras entre objectos com soluções construtivas, classificadas por zonas térmicas. Neste caso foram definidas duas zonas térmicas, a circulação comum e a zona fração autónoma.

### 3.4.3.3 Soluções construtivas

A escolha das soluções construtivas foram feitas com base no descrito anteriormente na secção 3.1. Como cada regulamento representa uma época específica, foi definido um conjunto de quatro soluções, uma para cada época/regulamento.

De seguida são apresentadas a composição e características de cada material não especificado na secção 3.1, como as caixilharias, os estores e os vidros dos vãos envidraçados. Tais características são representadas na Figura 3.14, 3.15 e 3.16.

Field	Units	Obj1
Name		CAIXILHARIA
Frame Width	m	0,1
Frame Outside Projection	m	0,05
Frame Inside Projection	m	0,05
Frame Conductance	W/m2-K	2
Ratio of Frame-Edge Glass Conductance to Center-Of-G		1
Frame Solar Absorptance		0,7
Frame Visible Absorptance		0,7
Frame Thermal Hemispherical Emissivity		0,9
Divider Type		DividedLite
Divider Width	m	0,17
Number of Horizontal Dividers		1
Number of Vertical Dividers		1
Divider Outside Projection	m	0,05
Divider Inside Projection	m	0,05
Divider Conductance	W/m2-K	2
Ratio of Divider-Edge Glass Conductance to Center-Of-		1
Divider Solar Absorptance		0,75
Divider Visible Absorptance		0,75
Divider Thermal Hemispherical Emissivity		0,9

Figura 3.14- Características da caixilharia utilizadas no *EnergyPlus*.

Field	Units	Obj1
Name		ESTORES
Solar Transmittance	dimensionless	0,4
Solar Reflectance	dimensionless	0,2
Visible Transmittance	dimensionless	0,4
Visible Reflectance	dimensionless	0,2
Infrared Hemispherical Emissivity	dimensionless	0,9
Infrared Transmittance	dimensionless	0
Thickness	m	0,005
Conductivity	W/m-K	0,1
Shade to Glass Distance	m	0,05
Top Opening Multiplier		0,5
Bottom Opening Multiplier		0,5
Left-Side Opening Multiplier		0,5
Right-Side Opening Multiplier		0,5

Figura 3.15- Características dos estores utilizadas no *EnergyPlus*.

Field	Units	Obj1
Name		Vidro (6mm)
Optical Data Type		SpectralAverage
Window Glass Spectral Data Set Name		
Thickness	m	0,006
Solar Transmittance at Normal Incidence		0,775
Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,071
Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,071
Visible Transmittance at Normal Incidence		0,881
Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,08
Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,08
Infrared Transmittance at Normal Incidence		0
Front Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84
Back Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84
Conductivity	W/m-K	0,9
Dirt Correction Factor for Solar and Visible Transmittance		0,9125
Solar Diffusing		No
Young's modulus	Pa	72000000000
Poisson's ratio		0,22

Figura 3.16- Características do vidro utilizadas no *EnergyPlus*.

É de salientar que as propriedades de cada material foram retiradas a partir dos documentos de apoio e exemplos disponibilizados pelo *Energy Plus*. Em todos os modelos simulados foi atribuído o mesmo estore e caixilharia. As várias soluções construtivas são inseridas e definidas em *Construction* e atribuídas a cada elemento que as represente.

#### 3.4.3.4 Elementos de sombreamento exterior fixos

As palas de sombreamento das janelas, em conjunto com os obstáculos existentes nas imediações do parque habitacional, podem desempenhar um papel muito importante no desempenho energético dum edifício devido à influência exercida na diminuição da incidência solar no Verão. Por este motivo, o comportamento térmico do edifício em estudo foi realizado através da implementação/construção de todos os pormenores com potencial impacto no sombreamento, como mostram a Figura 3.17 e a Figura 3.18. As palas são projetadas de forma a sombrear os vão-vidraçados no Verão e a não sombrear no Inverno (vd 3.1). As suas dimensões são inseridas em *Shading: Overhang* e para o caso do parque habitacional em *Shading: Site*.

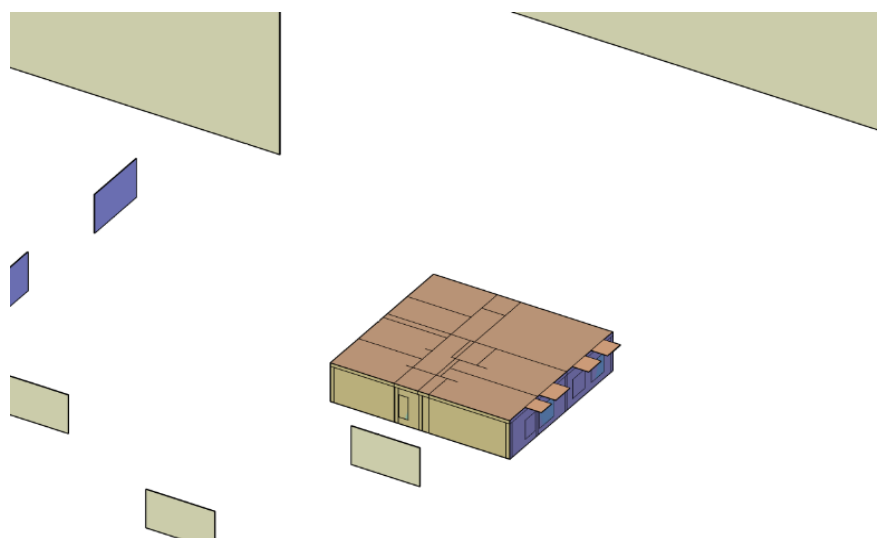


Figura 3.17- Vista sudoeste da habitação estudada com a definição dos obstáculos.

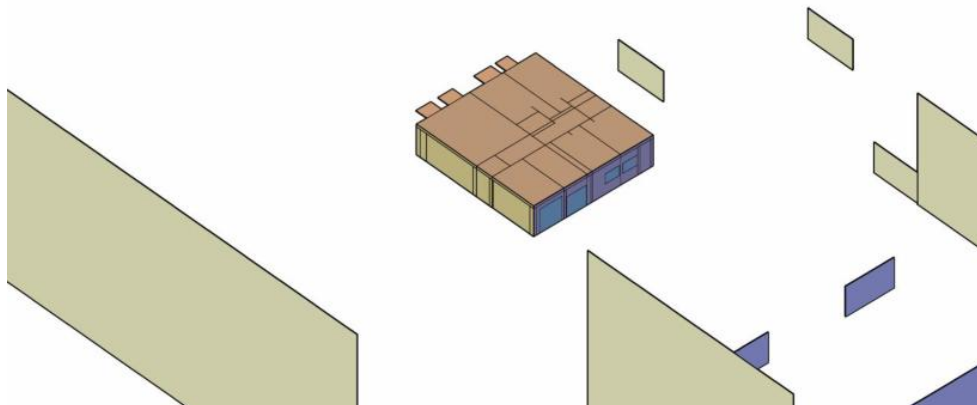


Figura 3.18- Vista nordeste da habitação estudada com a definição dos obstáculos.

### 3.4.3.5 Proteção solar móvel

Os dispositivos de proteção solar móveis foram introduzidos respeitando tanto quanto possível os pressupostos descritos pela legislação portuguesa. No caso da estação de aquecimento, de forma a maximizar o aproveitamento da radiação solar, os dispositivos de proteção solar móveis estão totalmente abertos. Já no caso da estação de arrefecimento os dispositivos encontram-se activos uma fração de tempo, que depende do octante no qual o envidraçado está orientado [14]. Seguindo a descrição e sabendo a orientação dos vãos envidraçados (vd.3.1) e recorrendo à Tabela 3.18 que descreve as frações de tempo em que os dispositivos móveis se encontram ativados, têm-se os dados concretos para modular o funcionamento das proteções moveis.

Tabela 3.18- Fração de tempo que os dispositivos móveis se encontram activados, *Fmv* (Fonte: Adaptado [13]).

Orientação do vão	N	NE/NW	S	SE/SW	E/W	H
<i>Fmv</i>	0	0,4	0,6	0,7	0,6	0,9

A modelação dos dispositivos móveis é feita recorrendo ao objecto *Window Property: ShadingControl*. Aqui, escolhe-se a localização do dispositivo, interior ou exterior, e definem-se as frações de tempo em que estes estão ativos. Neste caso, foram criados três objectos distintos, um para os vãos a Norte, outro para os vãos a Sul e um ultimo para o vão a Oeste. Para todos, foi definido em *Shading Type* a opção de inserir os dispositivos pelo exterior dos envidraçados (vd.3.1).

A Norte, em ambas as estações (aquecimento e arrefecimento), os dispositivos móveis foram assumidos abertos todo o ano. A sua modelação é feita em *Shading Control Type*, recorrendo à opção *AlwaysOff*.

A Sul e a Oeste, apenas na estação de aquecimento os dispositivos solares móveis estão desativados. Em ambas as orientações, para a estação de arrefecimento está estipulado pela regulamentação que a fração de tempo de ativação é de 0,6. Interpretando este valor como representativo de 60% do tempo da estação de arrefecimento, foi incorporada nos modelos a programação para os dispositivos de sombreamento estarem ativos durante a percentagem de tempo referida. Não havendo uma opção em *Shading Control Type* que se possibilite definir a

percentagem de ativação dos dispositivos, recorreu-se à opção *OnScheduleAllows*. Esta opção possibilita ao utilizador recorrer a objectos definidos em *Schedule : Compact*. Assim é possível programar quais as horas em que os dispositivos permanecem abertos ou fechados e em que meses do ano. Foram então criados dois objectos, um para os vãos envidraçados a Sul e outro para o vão a Oeste. Em ambos, foi definido, para os meses de aquecimento, durante o horário de permanência de radiação solar, que os estores estariam totalmente abertos. A estação de arrefecimento foi definida para que os dispositivos estivessem ativos 60% do dia. Houve a preocupação de distinguir os dois octantes, devido às horas do dia em que há maior incidência de radiação solar. A orientação Oeste, definida como Poente, é caracterizada por radiação solar directa desde o meio-dia solar até ao ocaso. A Sul, a presença solar faz-se sentir com maior significância a partir das 9h até as 15h. Assim, para minimização do efeito da radiação solar na estação de arrefecimento, foi incorporada a programação do horário de ativação dos estores que coincidam com as horas de maior incidência solar directa e que respeitem a percentagem de 60% definidas pelos regulamentos.

#### **3.4.3.6 Ganhos térmicos internos**

Os ganhos térmicos internos são constituídos pelos ocupantes, dispositivos de iluminação e equipamentos existentes numa determinada zona térmica. O valor utilizado na modelação dos vários casos de estudo é o correspondente à regulamentação portuguesa, ou seja, 4 W/m<sup>2</sup> durante todo o ano. Este valor foi introduzido no campo de simulação *ElectricEquipment*, considerando que 0% deste valor é convertido em calor latente, que 30% é calor radiante e que há 0% de perdas de energia em forma de trabalho mecânico ou calor ventilado para a atmosfera.

#### **3.4.3.7 Ventilação natural**

A ventilação natural é vista como uma solução para a manutenção da salubridade do ar interior. A regulamentação portuguesa define uma taxa de referência para a renovação do ar entre 0,4 a 0,6 renovações por hora. Em *Zone infiltration: DesignFlowRate* são definidos três objectos. Dois definem a zona térmica fracção autónoma e o último a zona térmica circulação comum. Os dois primeiros diferenciam a fracção autónoma em estação de aquecimento e arrefecimento, sendo atribuídos os valores de 0,4 e 0,6 renovações horárias, respetivamente. À circulação comum é atribuído o valor 1, por ser uma zona de passagem e por não haver controlo de fecho de portas e janelas.

#### **3.4.3.8 Controlo da temperatura interior**

O cálculo das necessidades de energia a partir do *EnergyPlus* foi feito com a criação de um HVAC fictício. O *software* de simulação aciona o sistema de controlo do ar quando as temperaturas interiores da fracção autónoma estiverem abaixo de 18°C ou acima de 25°C. Esta gama de temperaturas é igual às temperaturas limites utilizadas no REH. Assim é possível comparar os valores das necessidades de energia dos dois métodos de cálculo.

#### **3.4.4 Ficheiros climáticos**

A escolha dos locais de simulação (regiões) foi feita com base nos objectivos definidos na dissertação (vd.3.2). A cada local de simulação corresponde um ficheiro climático obtido a partir do *site* oficial do *EnergyPlus*. Para uma melhor perceção dos climas dos locais em estudo, apresenta-se de seguida uma análise comparativa realizada com base nas temperaturas médias mensais e no número de graus-dia de cada região.

A Figura 3.19 representa em gráfico as temperaturas médias mensais das três regiões estudadas. Estas temperaturas foram calculadas através das temperaturas exteriores fornecidas pelos ficheiros climáticos. Lisboa é a cidade com temperaturas médias mensais maiores no ano inteiro, Coimbra é a segunda cidade mais quente na quase totalidade do ano;



porém, nos meses de Julho e Agosto, Bragança atinge temperaturas médias mensais mais elevadas.

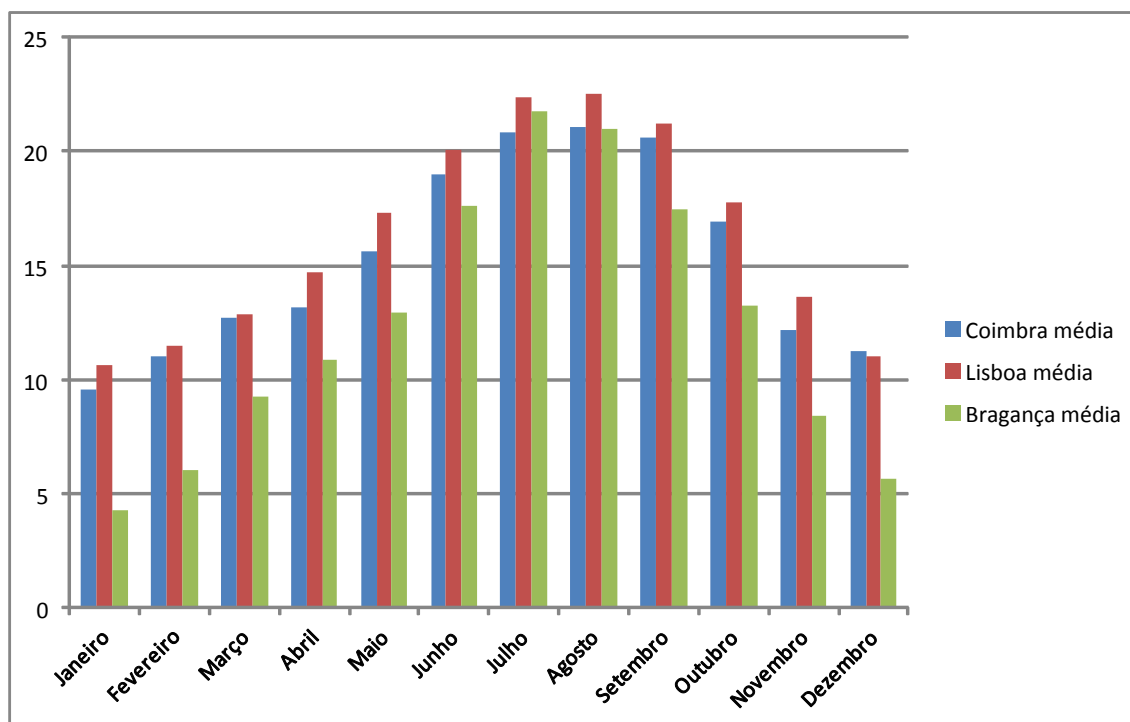


Figura 3.19- Temperatura média mensal exterior de Bragança, Coimbra e Lisboa.

### 3.4.5 Resultados pretendidos

Em toda a evolução da regulamentação portuguesa sobre comportamento térmico dos edifícios, é definido um intervalo de temperatura interior para o cálculo das necessidades de energia. Contudo, não é explícita a obrigatoriedade de instalação e/ou utilização de sistemas de climatização que possam garantir esse intervalo de temperatura. Por este motivo, o presente estudo não se limitou apenas a procurar determinar as necessidades de energia útil em cada estação e localização; simulou ainda o comportamento térmico do edifício em regime livre, isto é, sem recorrer a sistemas de climatização. Este tipo de abordagem é muito útil na medida em que a evolução das temperaturas interiores, obtida com recurso ao *EnergyPlus*, funciona como indicador do nível de conforto interior. Assim, os parâmetros solicitados ao programa foram: a temperatura exterior e interior (valores horários), a temperatura interior operativa (valores horários) e as necessidades de energia útil para aquecimento e arrefecimento (valores anuais).



## 4. Análise de resultados

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos a partir das duas ferramentas de cálculo e a comparação de ambos, recorrendo a quatro estratégias distintas. Primeiramente, no subcapítulo 4.1, são apresentados e discutidos os valores das necessidades de energia referentes às duas metodologias de cálculo, nomeadamente, a regulamentar e a simulação dinâmica. Segue-se, em 4.2, a apresentação de frequências acumuladas das temperaturas interiores com o intuito de identificar as soluções e climas mais desfavoráveis em termos do conforto térmico dos habitantes. Por fim, em 4.3 é feito de novo uma avaliação do conforto térmico, porém, esta abordagem é realizada utilizando para o efeito uma escala adaptativa conforme indicado na secção 2.5.3.3.

Para melhor compreensão, apresentam-se na Tabela 4.1 valores do coeficiente de transmissão térmica médio  $U_m$  correspondentes a cada período em estudo.

Tabela 4.1- Valores do coeficiente de transmissão térmica médio  $U_m$  correspondente a cada período em estudo.

<b>Norma</b>	<b>RCCTE 1990</b>	<b>RCCTE 2006</b>	<b>REH 2013</b>	<b>REH 2016</b>
$U_m$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	0,99	0,71	0,58	0,36

Deste modo, a cada período foi atribuído um coeficiente de transmissão médio, calculado a partir das soluções construtivas das envolventes opacas representativas de cada época. É visível que com a evolução da regulamentação, houve uma diminuição do coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior.

### 4.1 Apresentação das necessidades energéticas

As Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam os valores das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento calculados a partir do *software* de simulação dinâmica *EnergyPlus* e com recurso a folha de cálculo regulamentar REH para as três zonas climáticas em estudo (Bragança, Lisboa, Coimbra), consoante os períodos que representam. Assim, são apresentadas três colunas em cada zona climática, onde a primeira representa as necessidades de energia para aquecimento (Nic), a segunda as necessidades de energia para arrefecimento (Nvc) e a terceira o somatório dos valores de Nic e Nvc ( $\Sigma$ ).

Tabela 4.2- Necessidades nominais anuais de energia útil, *EnergyPlus*.

<b>Energy Plus</b>	<b>Bragança (kW/m<sup>2</sup>.ano)</b>			<b>Coimbra (kW/m<sup>2</sup>.ano)</b>			<b>Lisboa (kW/m<sup>2</sup>.ano)</b>		
$U_m$ (w/m <sup>2</sup> .°C)	Nic	Nvc	$\Sigma$	Nic	Nvc	$\Sigma$	Nic	Nvc	$\Sigma$
0,99	18	8	25	2	13	15	2	11	13
0,71	8	8	16	0	15	15	0	14	14
0,58	6	9	14	0	15	15	0	15	15
0,36	2	10	12	0	18	18	0	19	19

Tabela 4.3- Necessidades nominais anuais de energia útil, REH.

Regulamento	Bragança (kW/m <sup>2</sup> .ano)			Coimbra (kW/m <sup>2</sup> .ano)			Lisboa (kW/m <sup>2</sup> .ano)		
Um(w/m <sup>2</sup> .°C)	Nic	Nvc	Σ	Nic	Nvc	Σ	Nic	Nvc	Σ
0,99	86	4	90	47	3	50	29	8	36
0,71	46	7	53	22	5	27	12	10	22
0,58	33	8	42	15	7	21	8	12	19
0,36	23	10	33	9	8	17	4	13	18

De forma a uma melhor perceção das diferenças entre os casos de estudo, os resultados são apresentados de forma gráfica nas Figuras 4.1 e 4.2, no caso da simulação dinâmica, e nas Figuras 4.3 e 4.4, no caso da situação regulamentar.

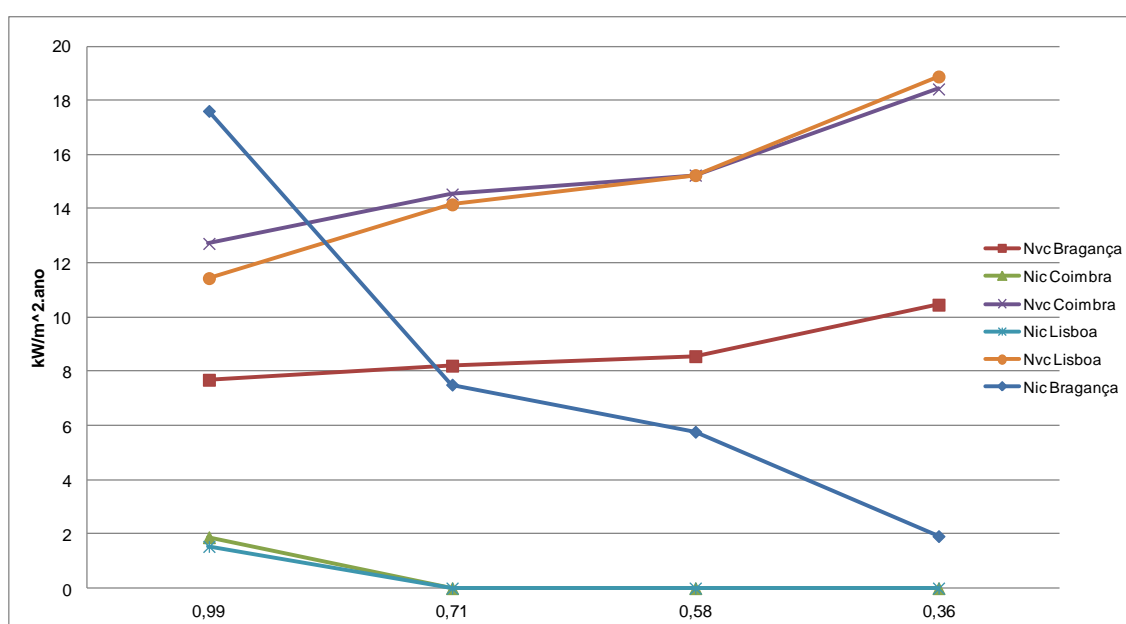


Figura 4.1- Gráfico representativo das necessidades nominais anuais de energia útil para estações de aquecimento e arrefecimento, *EnergyPlus*.

Ao analisar em separado o comportamento térmico do edifício em cada estação, observa-se que a diminuição do coeficiente de transmissão térmica da envolvente do edifício favorece o comportamento na estação de aquecimento, visto que os valores das necessidades diminuem em todas as zonas climáticas. Já no caso da estação de arrefecimento, o comportamento térmico do edifício é penalizado com a diminuição do coeficiente de transmissão térmica da envolvente, como era esperado. Ao aumentar a resistência térmica da envolvente dos edifícios, as trocas térmicas entre o ambiente interior e o ambiente exterior diminuem. No interior das habitações é gerado calor proveniente da radiação solar incidente nas superfícies interiores e dos ganhos térmicos internos. Ao restringir as trocas entre os dois ambientes, o calor gerado acumula-se no interior das habitações, que, em meses de inverno, onde as temperaturas exteriores são baixas, ajuda a uma manutenção da temperatura interior acima de 18°C. Em meses de Verão, as temperaturas exteriores tendem a ser elevadas e com a diminuição do U da envolvente, diminui-se a entrada de calor proveniente do exterior, mas identicamente, diminuem-se as perdas de calor do edifício para o exterior. Quando os ganhos de calor são superiores às perdas, verifica-se o aumento de temperatura interior que, em meses de Verão, pode levar a situações de sobreaquecimento.

A partir da Figura 4.1 é possível observar que os valores de  $N_{ic}$  e  $N_{vc}$  são semelhantes para as zonas climáticas de Lisboa e Coimbra, e que para a região de Bragança se verifica uma situação muito distinta. Na zona de Bragança, o valor do  $N_{ic}$  é muito alto em relação às restantes zonas para um  $U_{m}=0,99$ , sendo notória uma grande diminuição das necessidades aquando da melhoria da envolvente. Em Coimbra e Lisboa, os valores de  $N_{ic}$  para  $U_{m}=0,99$  são muito baixos, atingindo valores nulos com a evolução regulamentar. A tendência de aumento de  $N_{vc}$  nas três regiões é semelhante, mas os valores em Bragança são relativamente mais baixos em todas as épocas regulamentares, comparativamente com as cidades de Lisboa e Coimbra.

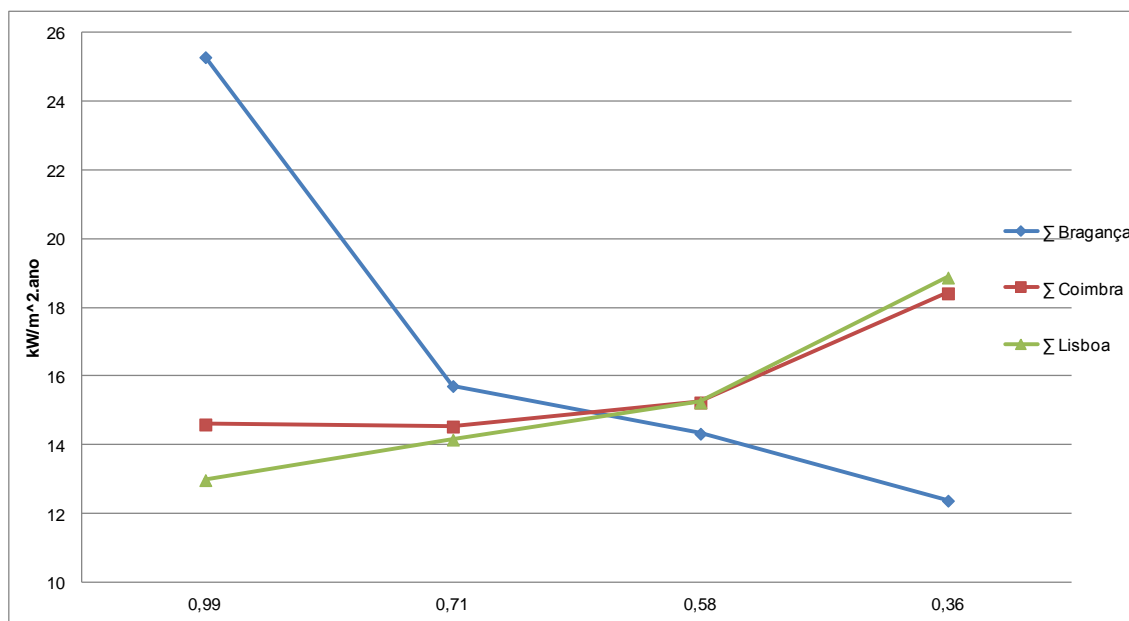


Figura 4.2- Gráfico representativo do somatório das necessidades nominais anuais de energia útil para estações de aquecimento e arrefecimento, *EnergyPlus*.

Relativamente ao somatório das necessidades para o ano todo, a zona climática de Bragança é a única que apresenta uma melhoria com a diminuição do  $U_m$ . Já no caso das zonas de Lisboa e Coimbra a diminuição do  $U_m$  leva a uma deterioração das necessidades energéticas em termos globais. Estes resultados são justificados pelas diferenças entre as zonas em termos de características do ambiente exterior. Bragança assume valores mais baixos de temperatura médias mensais em todo o ano, relativamente a Lisboa e Coimbra. Lisboa e Coimbra assumem valores muito próximos, ainda que Lisboa tende a ter temperatura médias mais elevadas (vd.3.2). Nestes dois últimos casos, os benefícios com a diminuição do  $U_m$  no Inverno não compensa a penalização dos resultados no Verão.

Os resultados obtidos com recurso a folha regulamentar são apresentados nas Figuras 4.3 e 4.4.

Seria de esperar que as evoluções regulamentares se traduzissem em níveis de comportamento energético cada vez melhores. Esta tendência verifica-se em todas as zonas climáticas quer no caso do comportamento de Inverno, quer no caso do comportamento global, ao contrário do que é indicado pela simulação dinâmica. Os valores das necessidades para arrefecimento também aumentam com o aumento do valor do  $U_m$  mas, como representam uma fração muito reduzida das necessidades globais, acabam por não influenciar o comportamento energético global. É de salientar que existem diferenças significativas entre os valores obtidos entre os dois métodos de simulação, principalmente no caso da situação de Inverno. Os valores das necessidades determinados com recurso ao REH são significativamente maiores, facto que pode dever-se a vários factores. São justificados, por um lado pela falta de

contabilização das pontes térmicas no *EnergyPlus*, e por outro pelo forte impacto das pontes térmicas no REH e pela falta de contabilização da inércia térmica por parte deste regulamento.

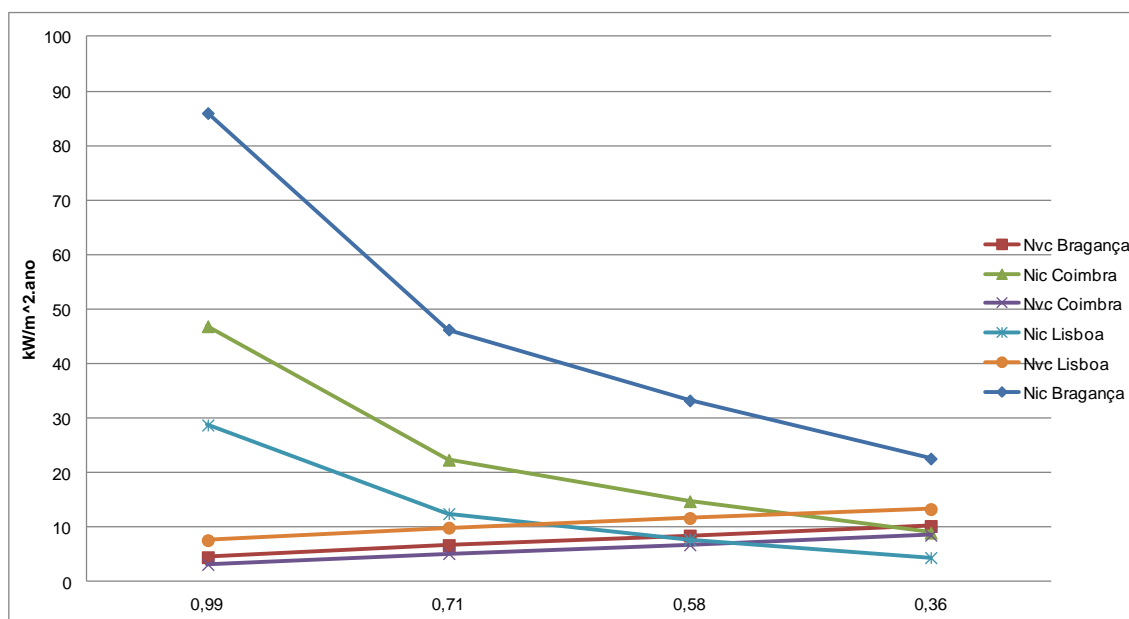


Figura 4.3- Gráfico representativo das necessidades nominais anuais de energia útil para estações de aquecimento e arrefecimento, REH.

A Tabela 4.4 resume a caracterização das cidades para as estações de aquecimento ( $^{\circ}\text{C.dia}$ ) e arrefecimento ( $\theta_{\text{ext}}$ ).

Tabela 4.4- Graus-dia e temperatura média exterior de Bragança, Coimbra e Lisboa.

Clima	$^{\circ}\text{C.dia}$	$\theta_{\text{ext}} (^{\circ}\text{C})$
Bragança	2006,6	21,54
Coimbra	1341	20,9
Lisboa	974,1	22,7

O cálculo de Nic baseia-se no somatório de três parcelas: transferência de calor por transmissão, transferência de calor por renovação do ar, factor de utilização de ganhos. A primeira corresponde ao tipo de soluções construtivas utilizadas para os elementos opacos, a segunda corresponde à ventilação natural e a terceira, aos vãos envidraçados e seus sombreamentos, bem como aos ganhos internos. Dentro de cada época regulamentar, a maior diferença entre as três zonas climáticas é representada pelo número de graus-dia que afecta as duas primeiras parcelas utilizadas para o cálculo de Nic. Quanto maior o número de graus-dia, maior é o valor das necessidades de energia e, por consequência, maior o potencial de melhoria. Observa-se assim que Bragança é a zona que assume maiores valores em cada época regulamentar, mas também as maiores alterações em termos de diminuição das necessidades com a evolução regulamentar. Em segundo lugar tem-se a zona de Coimbra e em terceiro a zona de Lisboa.

A estação de arrefecimento segue o mesmo tipo de raciocínio, pois as soluções construtivas dos vãos envidraçados, elementos opacos e elementos de sombreamento são iguais para as três zonas, apenas diferenciadas pela época que representam. Assim, neste caso, a característica que mais condiciona o comportamento nesta estação é representada pela  $\theta_{\text{ext}}$ , uma vez que os valores da energia solar média incidente  $I_{\text{sol}}$  são semelhantes em todas as três

zonas. Assim, a zona de Lisboa, ao assumir valores de temperatura exterior maior, é a que apresenta valores maiores de  $N_{vc}$  para toda a evolução regulamentar, seguida de Bragança e, por último, de Coimbra. É de notar que a evolução dos valores de  $N_{vc}$  é linear para todas as zonas climáticas em estudo.

É então observado que, quanto maior for o número de  $^{\circ}\text{C}.\text{dia}$  e o valor de  $\theta_{ext}$ , maior será o valor de  $N_{ic}$  e  $N_{vc}$ , respectivamente.

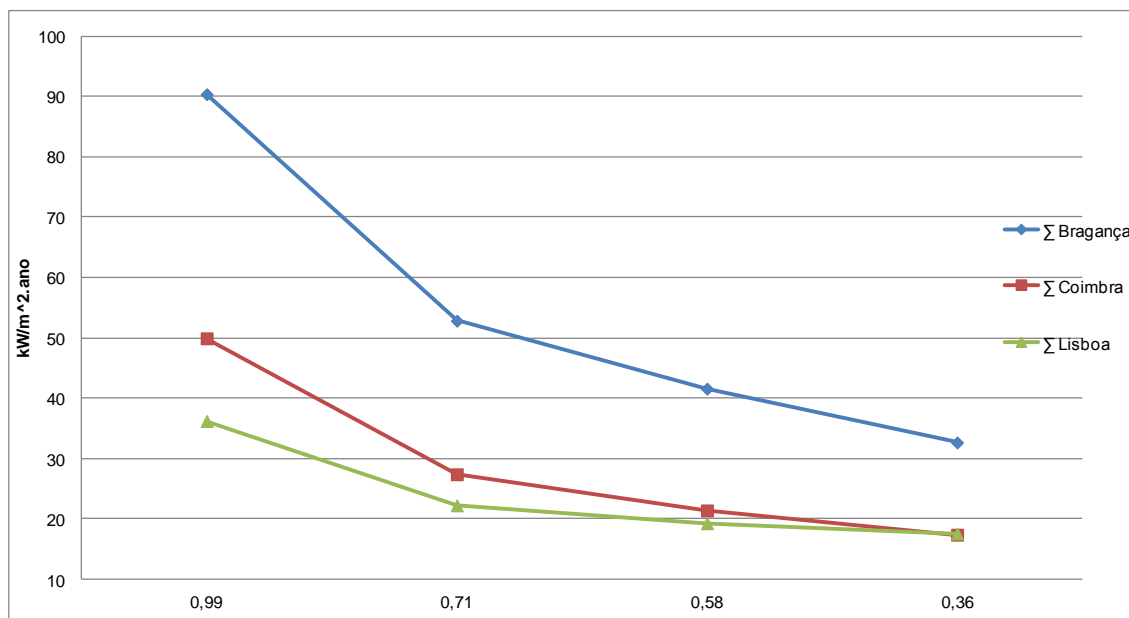


Figura 4.4- Gráfico representativo do somatório das necessidades nominais anuais de energia útil para estação de aquecimento e arrefecimento, REH.

Como é observado na Figura 4.4, ao somar os valores de  $N_{ic}$  e  $N_{vc}$ , em todas as zonas climáticas, os resultados vão ser menores com a evolução regulamentar, isto é, com a diminuição do coeficiente de transmissão térmica da envolvente.

## 4.2 Apresentação de resultados de frequência acumulada

Nesta secção são apresentados os valores da frequência acumulada de temperatura interior determinada segundo a metodologia indicada na secção 2.5.2. para determinar a percentagem de conforto térmico correspondente a várias variáveis construtivas. Os valores de frequência acumulada foram retirados a partir do programa de simulação dinâmica, *EnergyPlus*, para os meses de Dezembro, Janeiro, Fevereiro e Março, correspondentes ao período de Inverno e para os meses de Junho, Julho, Agosto e Setembro, correspondentes ao período de Verão.

Salienta-se que as simulações realizadas com este intuito não consideram aquecimento ou arrefecimento com recurso a equipamentos de climatização. Esta abordagem, conhecida na literatura como comportamento em regime livre, tem o intuito de por em evidência o impacto da evolução regulamentar (com o aumento da resistência térmica) nas condições de conforto térmico dos ocupantes.

No presente subsecção, foram elaborados dois gráficos para cada zona climática, que representam as temperaturas interiores, nos meses de Verão e Inverno, para cada período regulamentar. As temperaturas interiores são representadas em forma de frequência acumulada, com o intuito de conseguir visualizar a percentagem que cada temperatura representa no intervalo de tempo simulado. Como referido anteriormente, os regulamentos

definem um intervalo de temperatura representativo do conforto térmico. Esse intervalo assume o valor limite inferior de 18°C para o período de Inverno e um valor limite superior de 25°C para o período de Verão. De modo a analisar criticamente as condições de conforto térmico, as percentagens obtidas foram representadas sob a forma de frequência acumulada em conjunto com a temperatura de conforto estipulada pela regulamentação portuguesa. As condições de conforto consideram-se satisfeitas se 80% dos valores se encontram dentro do intervalo de conforto.

#### 4.2.1 Período de Inverno- Frequência acumulada

A estação de Inverno é representada pelos meses de Dezembro, Janeiro, Fevereiro e Março. Tconf representa a temperatura limite estipulada pela regulamentação, sendo a esta estação atribuído o valor de 18°C. As figuras seguintes apresentam no eixo das abcissas as temperaturas interiores do edifício e nas ordenadas as frequências acumuladas correspondentes a cada valor da temperatura interior,  $T_i$ . Cada curva representa as temperaturas interiores correspondentes a um período regulamentar identificado em termos de  $U_m$ . Assim, a percentagem de valores de tempo de desconforto é indicada pela intersecção da curva de frequência acumulada com a recta correspondente a Tconf. Por exemplo, se a frequência acumulada abaixo do valor limite for de 30%, isto significa que em 30% da estação, os ocupantes estão em desconforto.

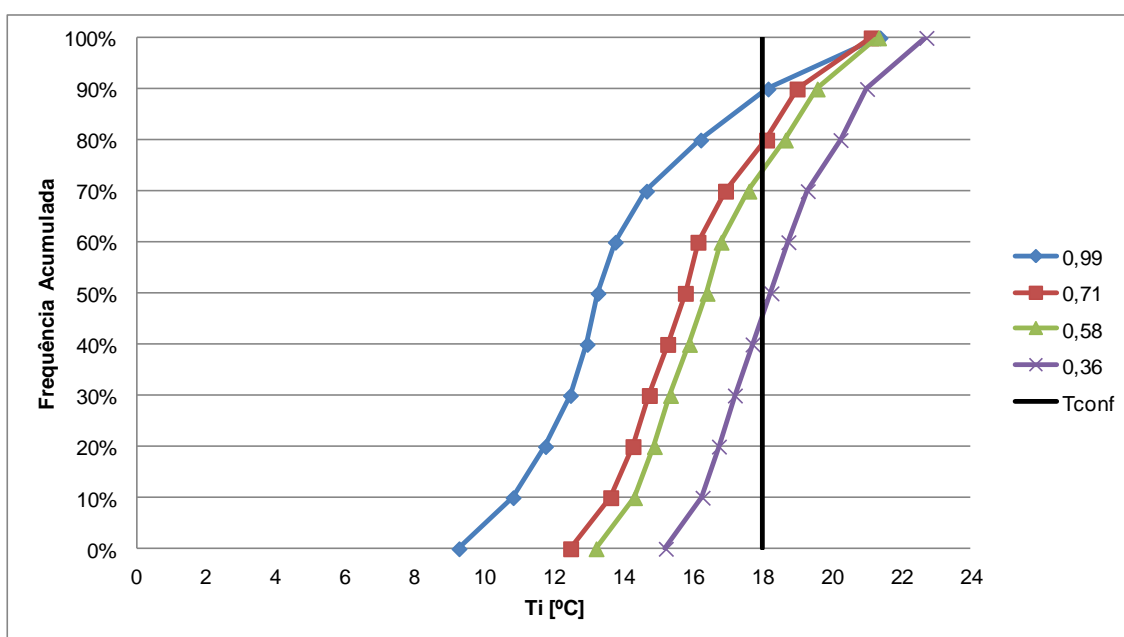


Figura 4.5- Gráfico de frequência acumulada Bragança, Inverno.

A Figura 4.5 apresenta a frequência acumulada das temperaturas interiores de Bragança. Esta zona climática é caracterizada por um Inverno rigoroso, com temperaturas exteriores que podem alcançar valores negativos. Todas as soluções apresentam baixas percentagens de conforto, apesar da alterações regulamentares proporcionarem um aumento ao longo das épocas. Verifica-se no caso do  $U_m = 0,99 \text{ W/m}^2\text{°C}$  a pior percentagem em termos de conforto térmico, com um valor de 90%. Os casos com  $U_m = 0,71 \text{ W/m}^2\text{°C}$  e  $0,58 \text{ W/m}^2\text{°C}$  apresentam valores semelhantes, com percentagens de 80% e 75%, respetivamente. Já o caso do  $U_m = 0,36 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , destaca-se por uma melhoria significativa, com uma percentagem de 50%, ainda assim inferior a condição estipulada para as condições mínimas de conforto.

Observa-se agora as frequências acumuladas de 50% em todas as soluções. Os  $U_m$  intermédios,  $0,71 \text{ W/m}^2\text{°C}$  e  $0,58 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , apresentam de novo valores parecidos, na casa dos



15°C, ou seja, 3°C abaixo do valor limite. No  $U_m=0,99 \text{ W/m}^2\text{°C}$  é atribuída uma temperatura interior de 13°C, ou seja, 5°C abaixo do limite. Conclui-se então que há uma grande melhoria com a evolução regulamentar mas não suficiente.

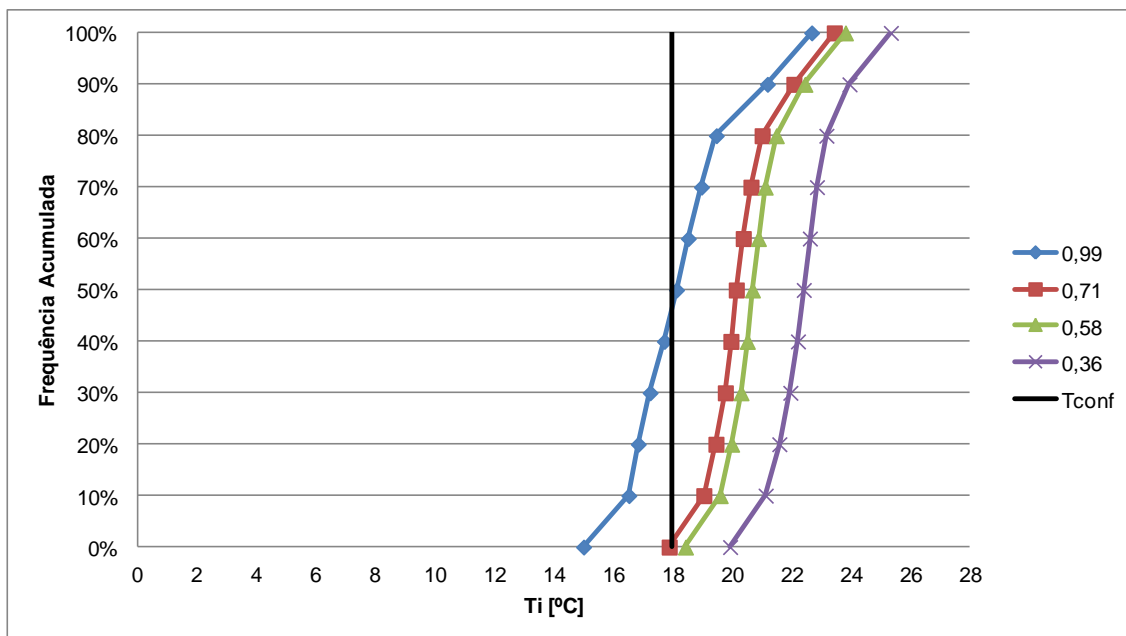


Figura 4.6- Gráfico de frequência acumulada Coimbra, Inverno.

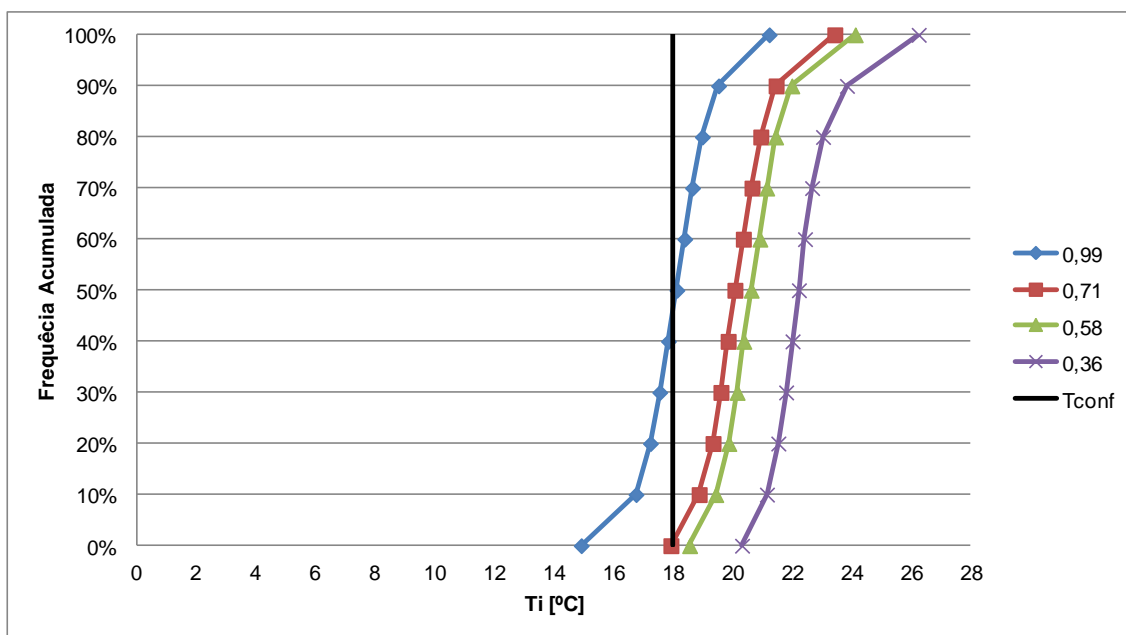


Figura 4.7- Gráfico de frequência acumulada Lisboa, Inverno.

Contrariamente a Bragança, Lisboa e Coimbra apresentam valores ideais com a evolução regulamentar. Como é visível nas Figuras 4.6 e 4.7, em ambos os casos, apenas quando  $U_m=0,99 \text{ W/m}^2\text{°C}$  é excedido, a condição de conforto mínima não é satisfeita. Conclui-se então que a diminuição do valor de  $U_m$  da envolvente dos edifícios é benéfica em termos de conforto durante a estação de Inverno.

### 4.2.2 Período de Verão- Frequência acumulada

A estação de Verão é representada pelos meses de Junho, Julho, Agosto e Setembro. A Tconf estipulada toma o valor de 25°C e é apresentada graficamente, igualmente efectuado no período de Inverno. A percentagem de tempo de desconforto no período de Verão é indicada pela subtração de 100% ao valor da percentagem da intersecção da curva de frequência acumulada com a recta correspondente a Tconf. Por exemplo, se a frequência acumulada acima do valor limite for de 20%, subtraindo 100 % a essa percentagem, significa que, em 80% da estação, os ocupantes da habitação encontram-se em desconforto.

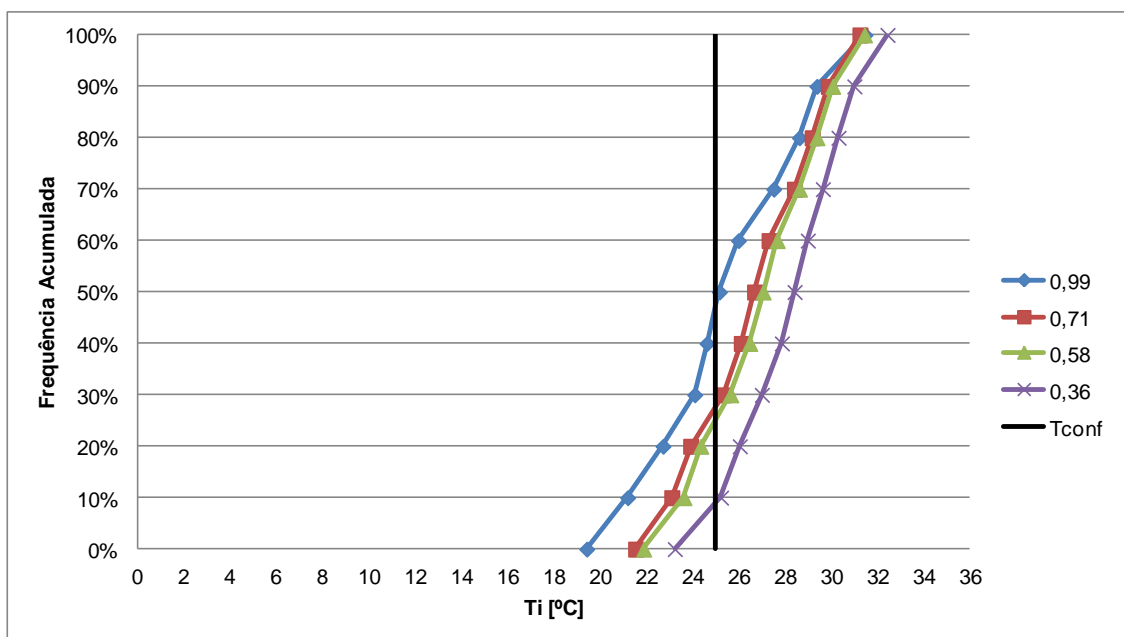


Figura 4.8- Gráfico de frequência acumulada Bragança, Verão.

Como se observou no cálculo das necessidades de energia, aqui também há uma penalização dos resultados com a evolução do regulamento. Bragança é de novo a zona climática que apresenta resultados bastante diferentes entre os três climas simulados. São visíveis na Figura 4.8, para a solução de  $U_m=0,99 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , valores de 50% de desconforto; já as soluções com  $U_m=0,71 \text{ W/m}^2\text{°C}$  e  $U_m=0,58 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , apresentam resultados semelhantes na casa dos 70% de desconforto. O  $U_m=0,36 \text{ W/m}^2\text{°C}$  toma valores de desconforto, em quase toda a estação, atingido 90%.

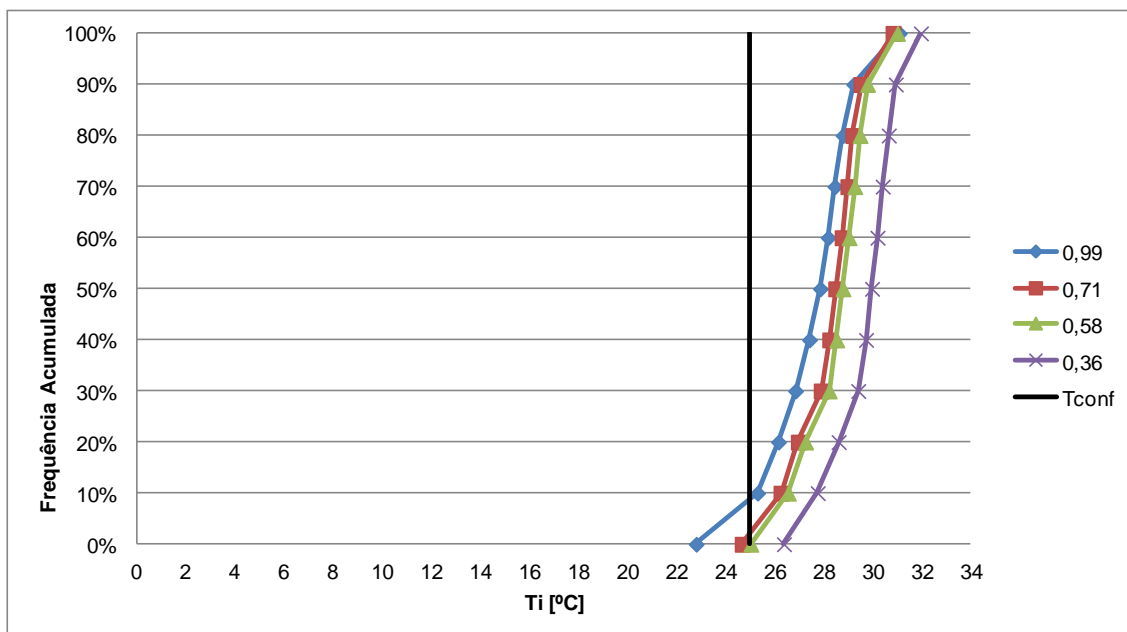


Figura 4.9- Gráfico de frequência acumulada Coimbra, Verão.

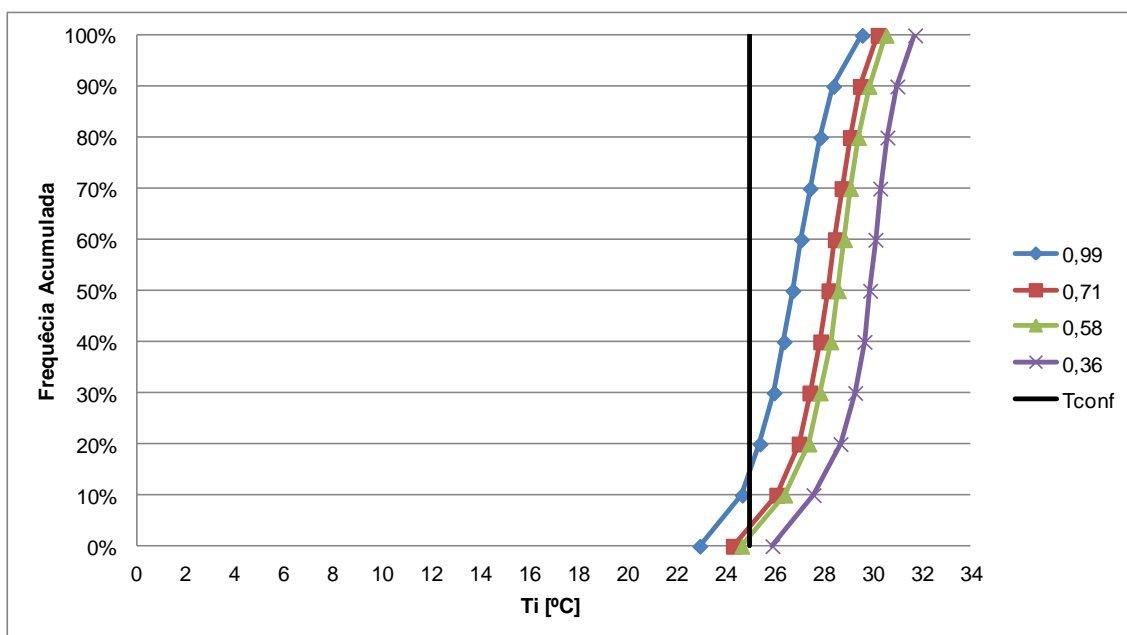


Figura 4.10- Gráfico de frequência acumulada Lisboa, Verão.

Coimbra e Lisboa apenas apresentam resultados com alguma percentagem de conforto para o  $U_m=0,99 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , sendo que apenas 10% da estação é representativa desse resultado. Todas as outras soluções tomam valores nulos, ou quase nulos, de conforto térmico. A diminuição do coeficiente de transmissão térmica da envolvente, como já explicado anteriormente, beneficia o aumento da temperatura média interior nos edifícios. Este fenómeno prejudica, e em muito, a estação de Verão, como é visível.

### 4.3 Modelo adaptativo EN 15251

No presente subcapítulo são apresentados os resultados obtidos através da estimativa das condições de conforto interior através do modelo adaptativo indicado pela norma EN 15251. Nesse sentido, e para melhor compreensão, os resultados são apresentados de forma separada para cada zona climática e época regulamentar. Assim, são ilustrados doze gráficos em cada estação com a indicação no eixo das ordenadas da temperatura média exterior ponderada,  $T_{mp}$ , e no eixo das abcissas da temperatura operativa interior,  $T_{oc}$ . Igualmente é representada a delimitação das condições de conforto segundo as categorias, conforme indicado na secção 2.5.3. Resumidamente, este modelo não limita um intervalo de temperaturas igualmente para todas as estações, mas, varia as temperaturas de conforto consoante a expectativa que os ocupantes possam ter em relação ao clima a que estão expostos e em relação às adaptações que possam fazer, para uma melhor aceitação do ambiente. Todas as temperaturas são calculadas com base nos resultados conseguidos através dos modelos do *software Energy Plus*, em que não foi utilizado o controlo de temperatura com auxílio de equipamentos de climatização.

#### 4.3.1 Período de Inverno- Modelo adaptativo

Seguindo o mesmo raciocínio até agora feito, os meses representativos da estação de Inverno, para o qual foram elaborados as simulações, são Dezembro, Janeiro, Fevereiro e Março, para as três zonas climáticas. O subcapítulo é dividido em três partes. A repartição é feita, primeiro por quatro gráficos representativos da cidade de Bragança, em seguida os quatro gráficos correspondentes a Coimbra e por último os de Lisboa. Dentro da subdivisão em quatro gráficos, cada gráfico representa os resultados da época a que as soluções construtivas correspondem.

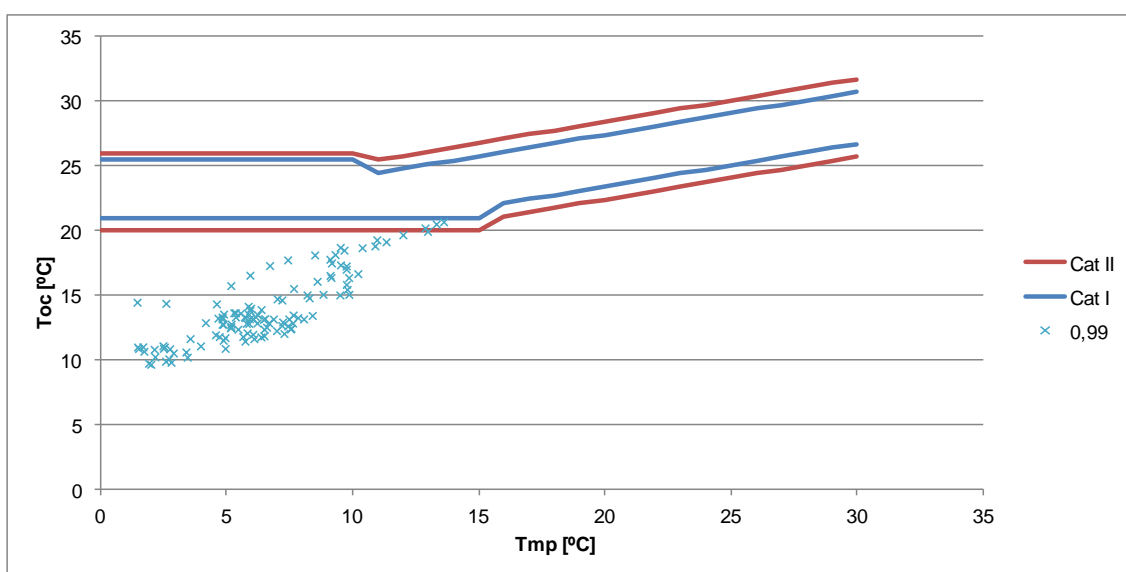


Figura 4.11- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Bragança- Inverno,  $U_m=0,99 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

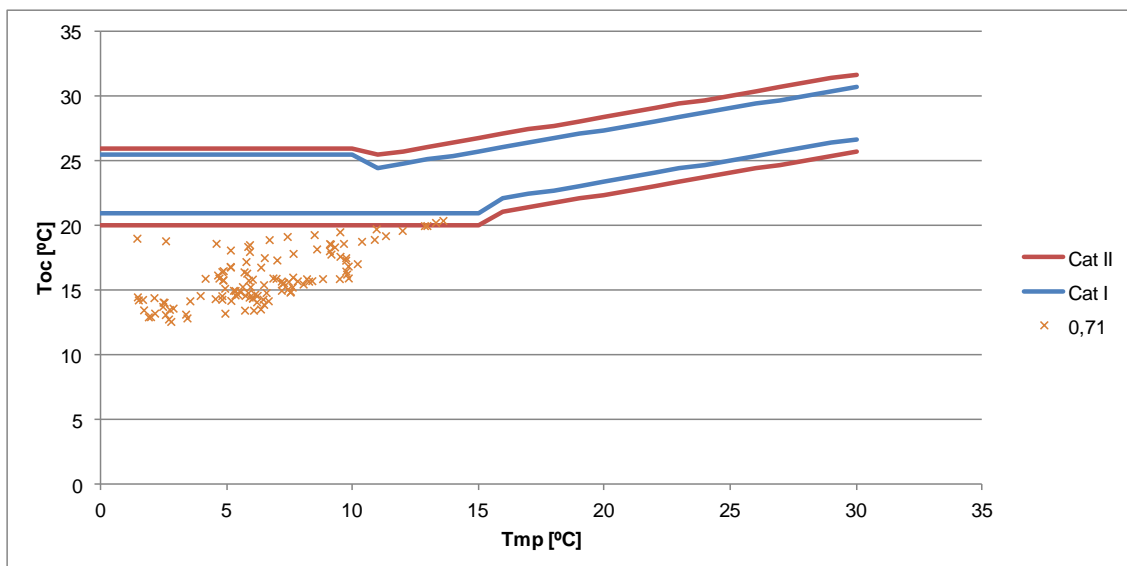


Figura 4.12- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Bragança- Inverno,  $U_m=0,71 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

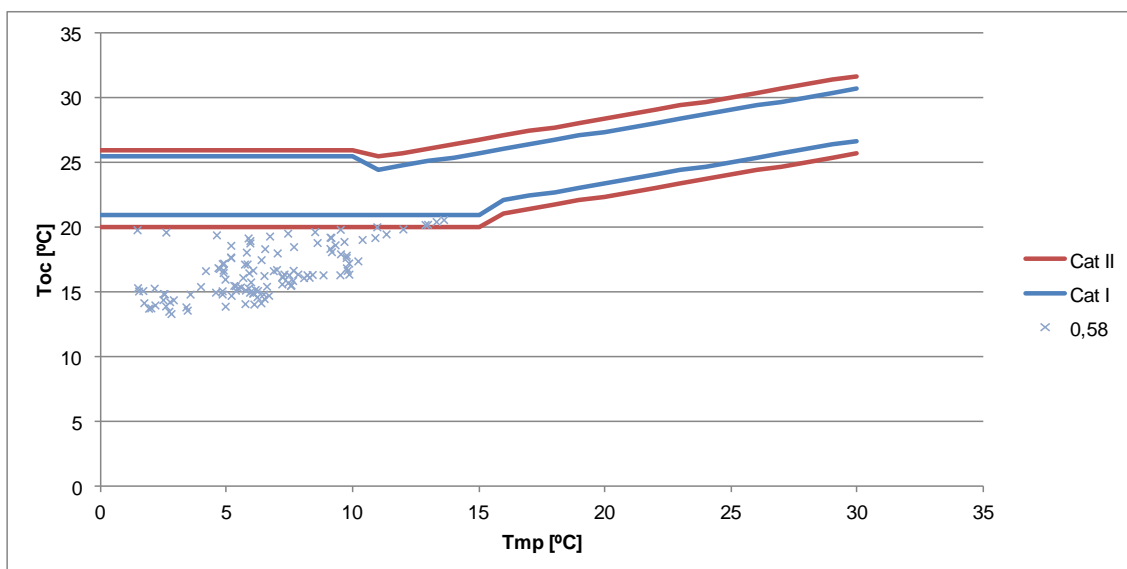


Figura 4.13- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Bragança- Inverno,  $U_m=0,58 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

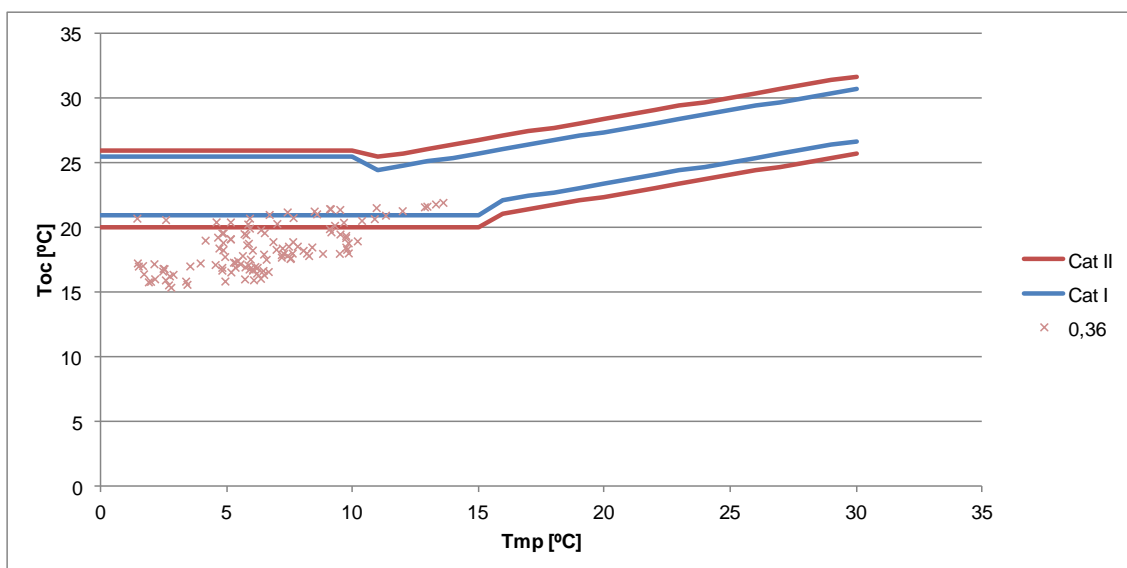


Figura 4.14- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Bragança- Inverno,  $U_m=0,36 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

Bragança apresenta de novo, valores muito abaixo de conforto para a época em questão. É também evidente que, com a evolução do regulamento, os resultados melhoram, mas nunca atingindo uma percentagem ideal. Essa percentagem não é alcançada, mas é visível uma aproximação das temperaturas operativas interiores aos valores limites de conforto. O  $U_m=0,36 \text{ W/m}^2\text{°C}$  é a única solução onde se verificam alguns resultados significativos dentro do intervalo de conforto e próximos da temperatura limite de conforto.

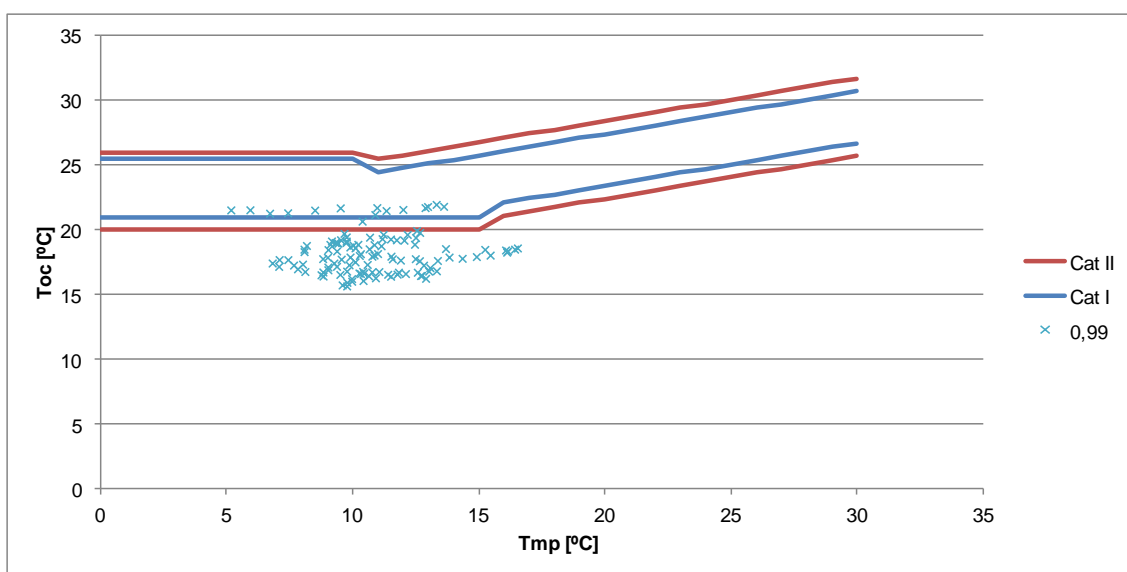


Figura 4.15- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Coimbra- Inverno,  $U_m=0,99 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

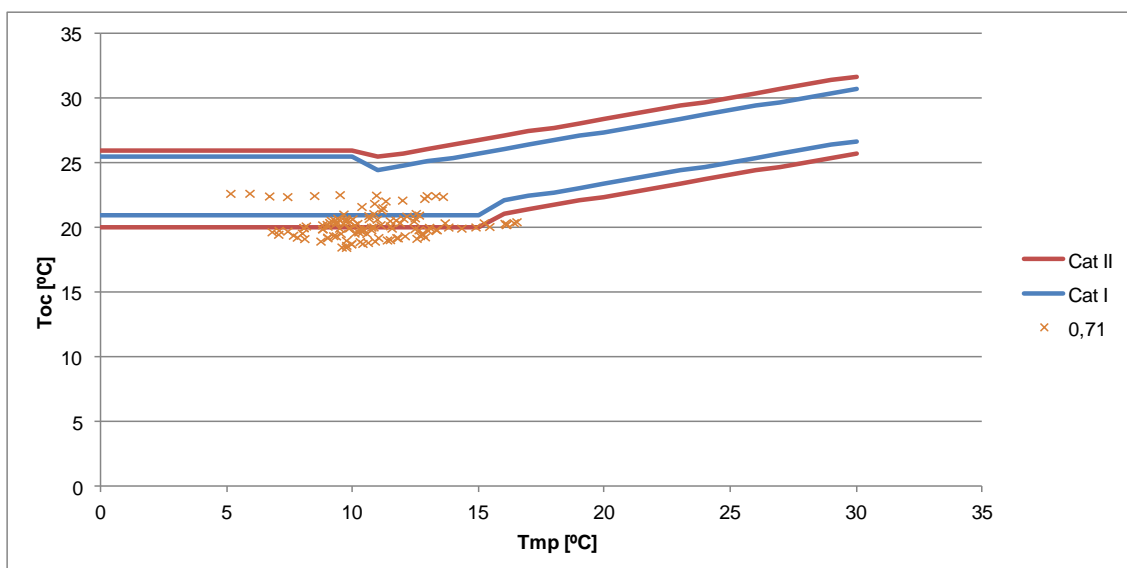


Figura 4.16- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Coimbra- Inverno,  $U_m=0,71 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

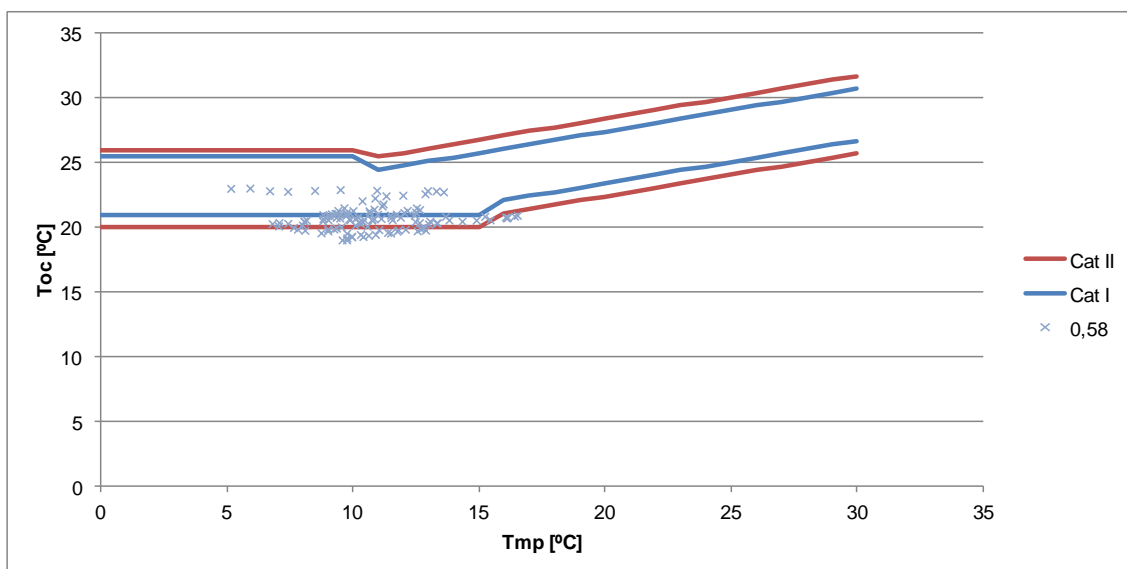


Figura 4.17- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Coimbra- Inverno,  $U_m=0,58 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

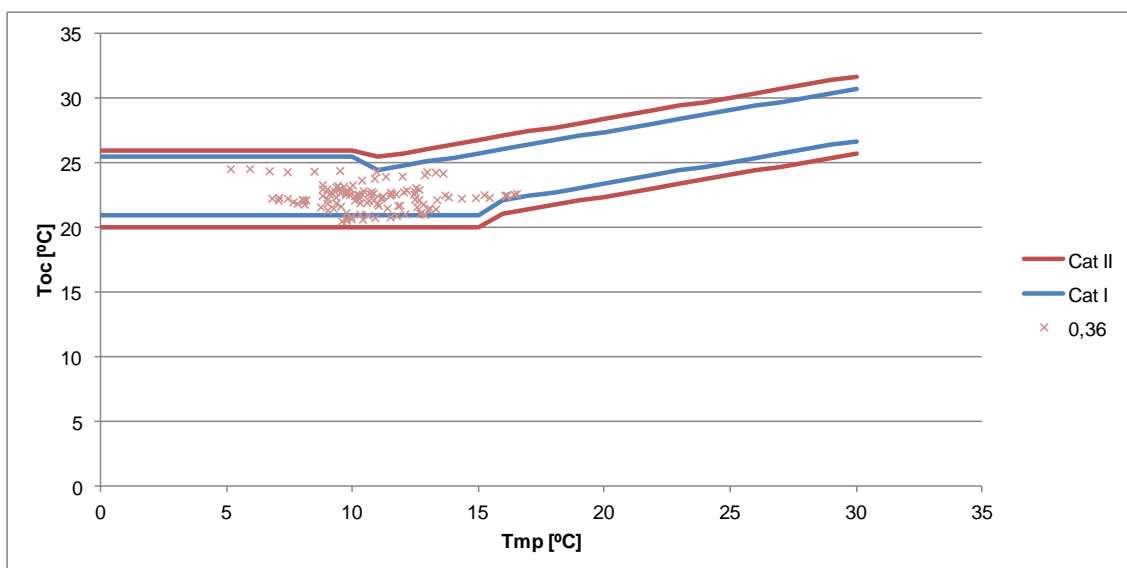


Figura 4.18- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Coimbra- Inverno,  $U_m=0,36 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

Em Coimbra é visível uma evolução positiva dos resultados. Inicialmente, para  $U_m=0,99 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , a percentagem de valores dentro do intervalo de conforto é pequena, mas as restantes temperaturas aproximam-se dos valores limites. Para  $U_m= 0,71 \text{ W/m}^2\text{°C}$  e  $U_m=0,58 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , os resultados são muito idênticos, apresentando valores significativamente aceitáveis, acima do valor inferior limite dos Cat II de pessoas confortáveis. A solução  $U_m=0,36 \text{ W/m}^2\text{°C}$  destaca-se pela totalidade de valores dentro dos limites de conforto e uma percentagem elevada dentro do intervalo da Cat I.

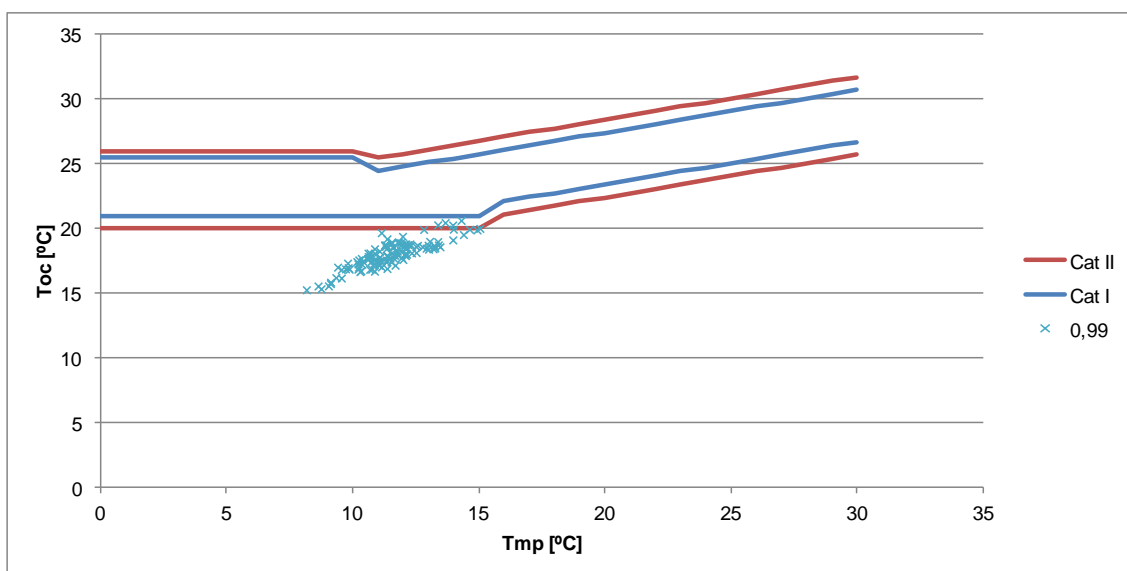


Figura 4.19- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Lisboa- Inverno,  $U_m=0,99 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .



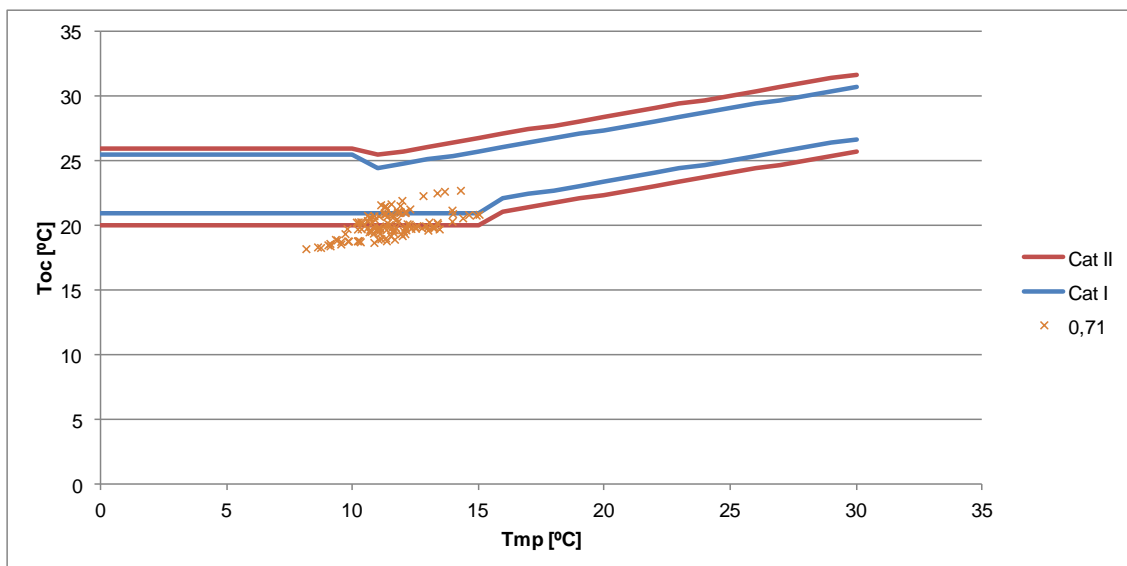


Figura 4.20- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Lisboa- Inverno,  $U_m=0,71 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

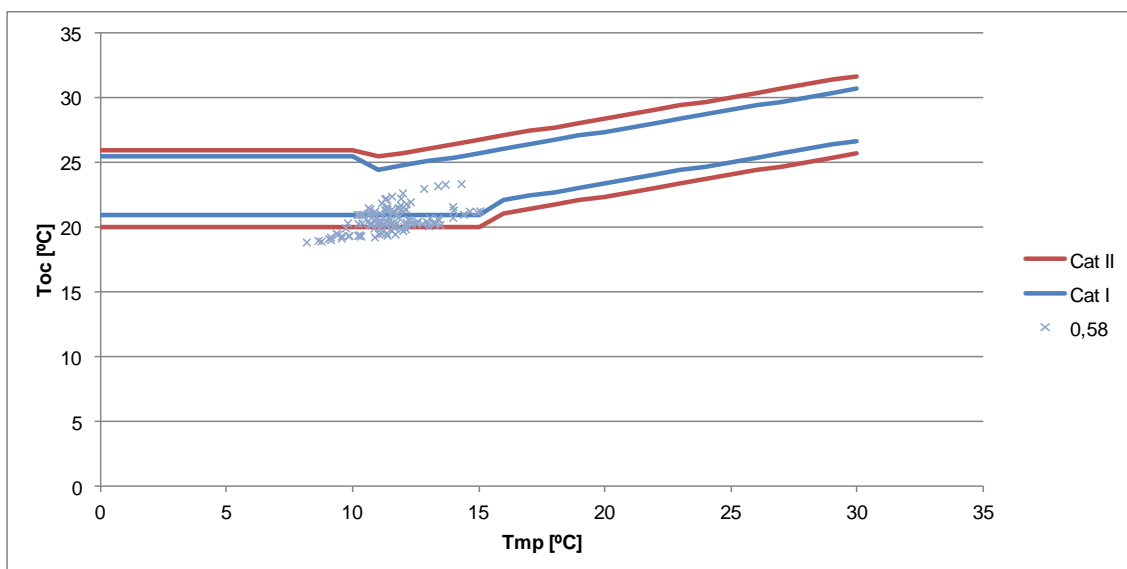


Figura 4.21- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Lisboa- Inverno,  $U_m=0,58 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

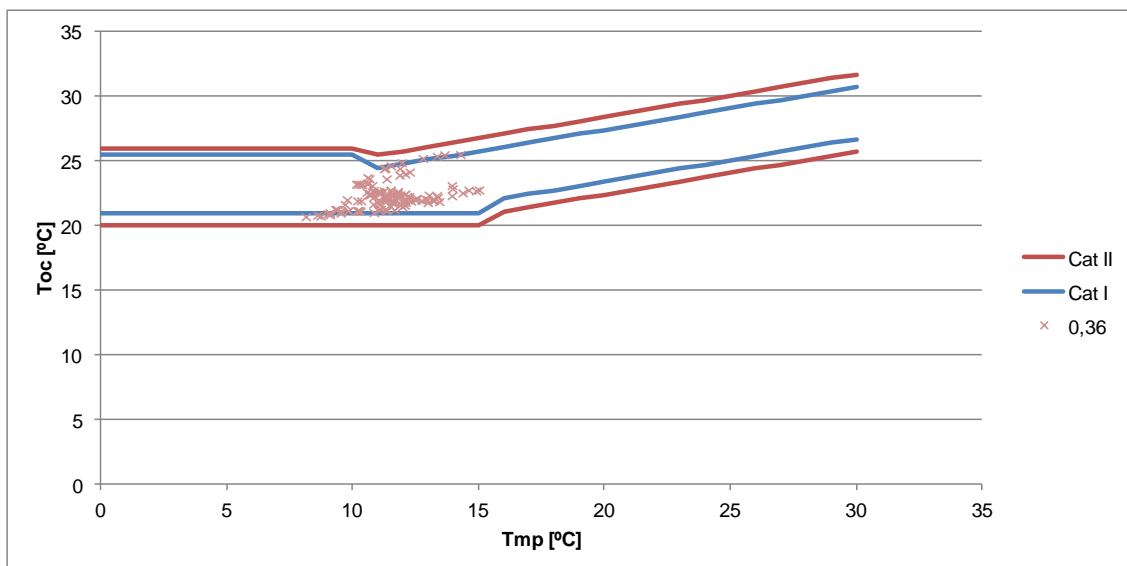


Figura 4.22- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Lisboa- Inverno,  $U_m=0,36 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

Em Lisboa, os resultados tomam o mesmo carácter evolutivo que os de Coimbra. Existe um parâmetro que distingue os dois climas, a variedade de Tnp. Em Coimbra é visível uma maior variedade de Tnp em relação a Lisboa. Estes resultados são justificados, pelo ambiente em Lisboa ser mais ameno, por pertencer a uma zona costeira. Esta variação em nada modifica as conclusões, dado que a análise é feita apenas em relação à percentagem de valores de conforto.

#### 4.3.2 Período de Verão- Modelo adaptativo

A estação de Verão apresenta os valores simulados para os meses de Junho, Julho, Agosto e Setembro, nas três zonas climáticas estudadas. Identicamente ao período de Inverno, esta estação também é dividida em três partes.

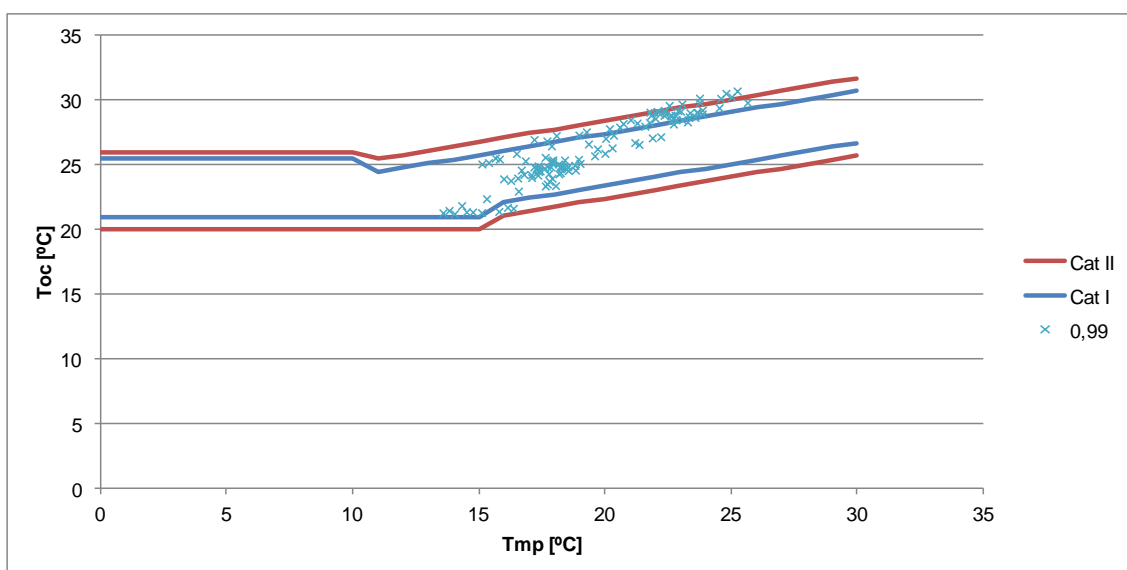


Figura 4.23- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Bragança- Verão,  $U_m=0,99 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

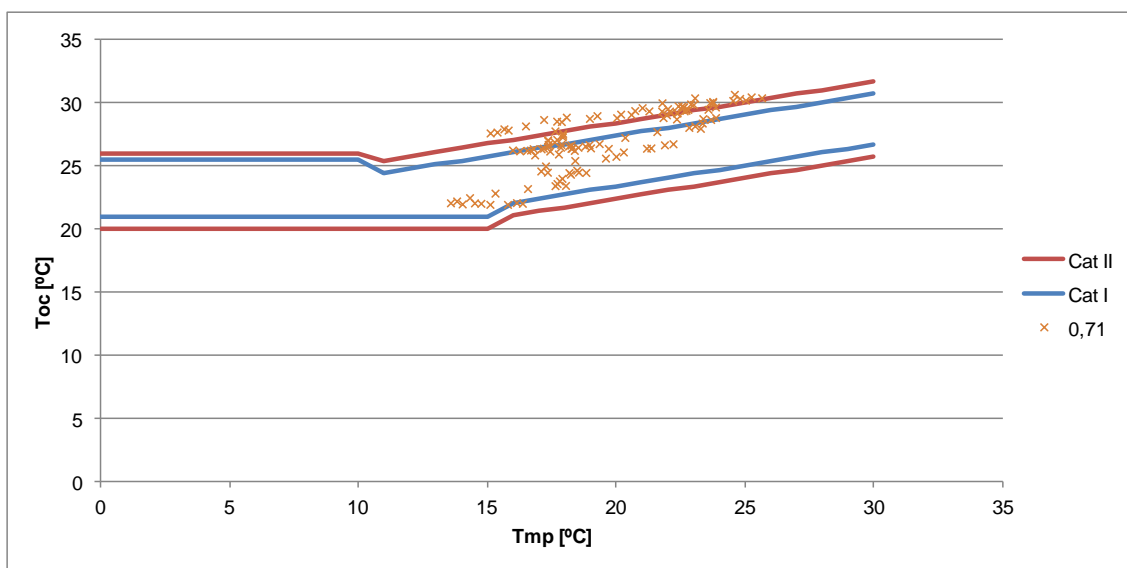


Figura 4.24- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Bragança- Verão,  $U_m=0,71 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

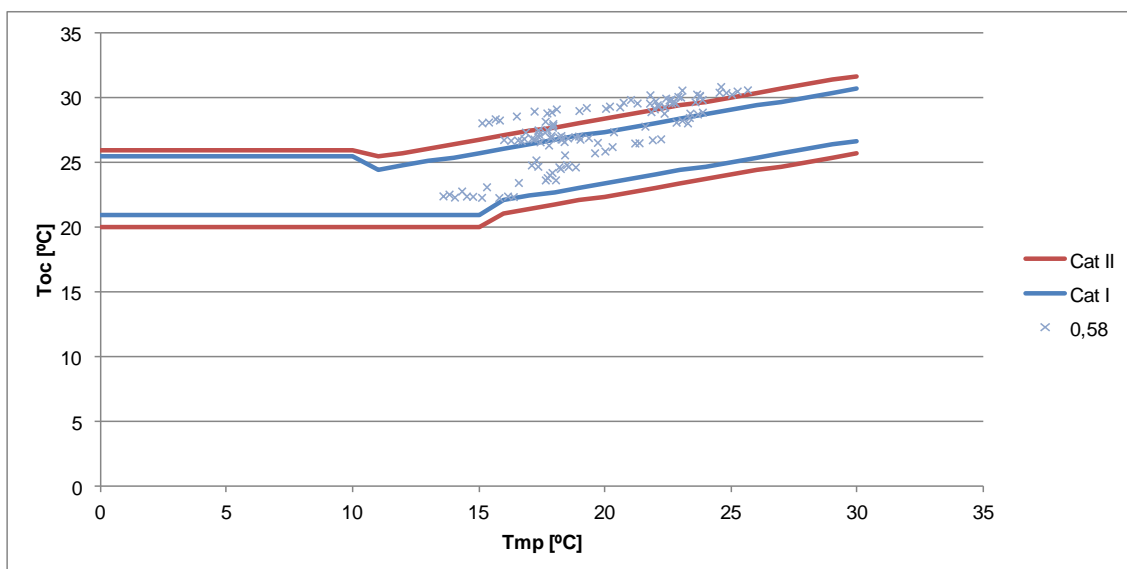


Figura 4.25- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Bragança- Verão,  $U_m=0,58 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

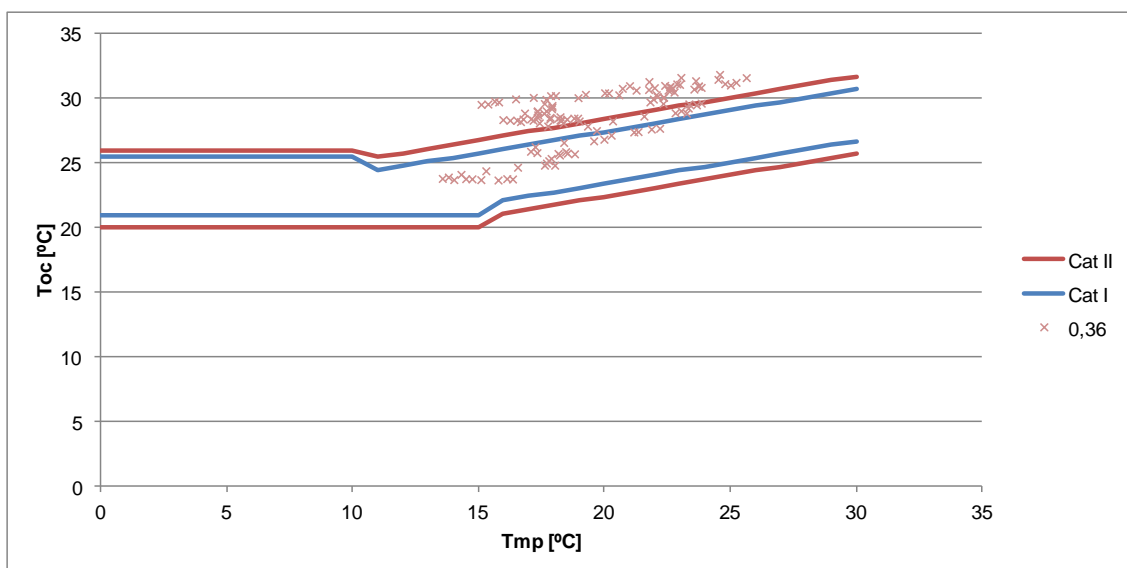


Figura 4.26- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Bragança- Verão,  $U_m=0,36 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

Os quatro gráficos acima mostram uma diminuição de tempo de conforto com a evolução do regulamento, para a cidade de Bragança. Na solução de  $U_m=0,99 \text{ W/m}^2\text{°C}$  é atingido a percentagem de quase 100% de conforto. As soluções de  $U_m=0,71 \text{ W/m}^2\text{°C}$  e  $U_m=0,58 \text{ W/m}^2\text{°C}$  apresentam, de novo, resultados muito semelhantes, em que é visível uma percentagem significativa de desconforto na estação, embora, as temperaturas que excedem o limite de conforto superior estejam próximas da delimitação entre conforto e desconforto. A solução  $U_m=0,36 \text{ W/m}^2\text{°C}$  apresenta valores parecidos de percentagem de tempo de desconforto às duas soluções anteriores; porém, os valores de desconforto atingem temperaturas com um gradiente elevado em relação às temperaturas limites de conforto.

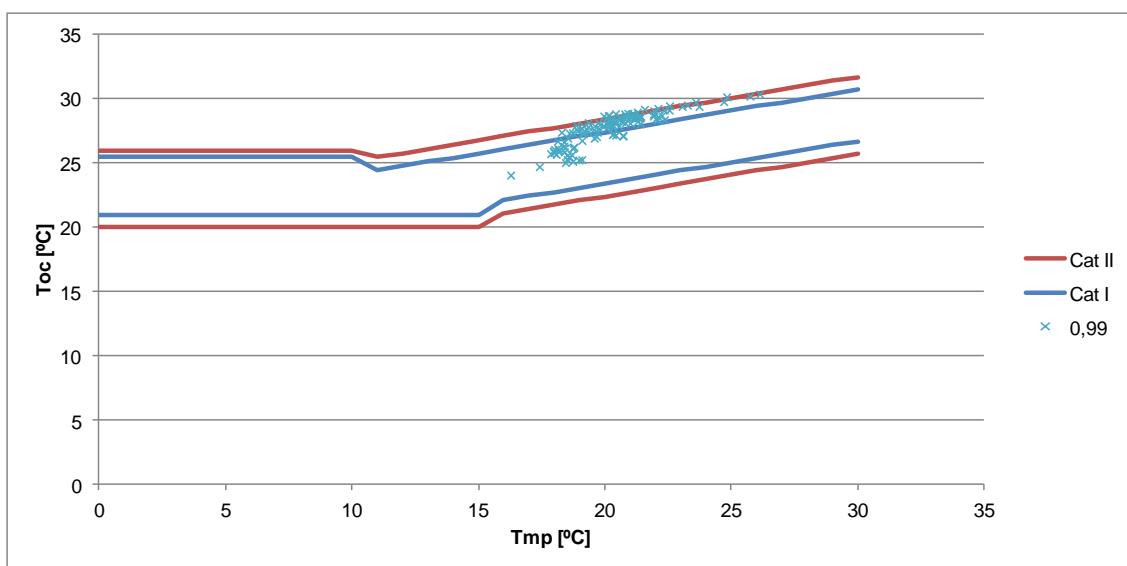


Figura 4.27- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Coimbra- Verão,  $U_m=0,99 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

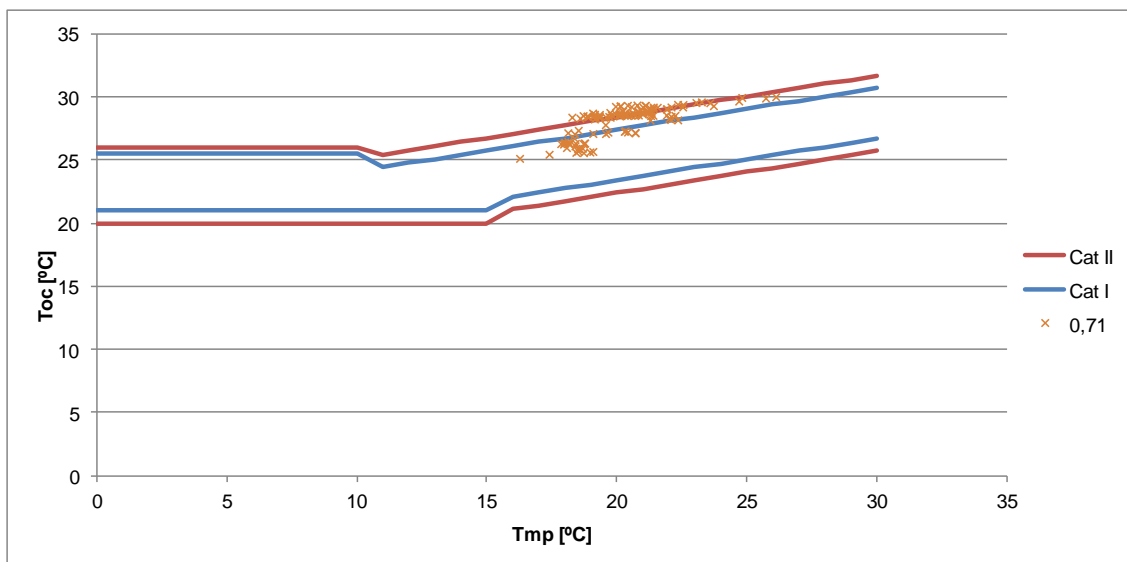


Figura 4.28- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Coimbra- Verão,  $U_m=0,71 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

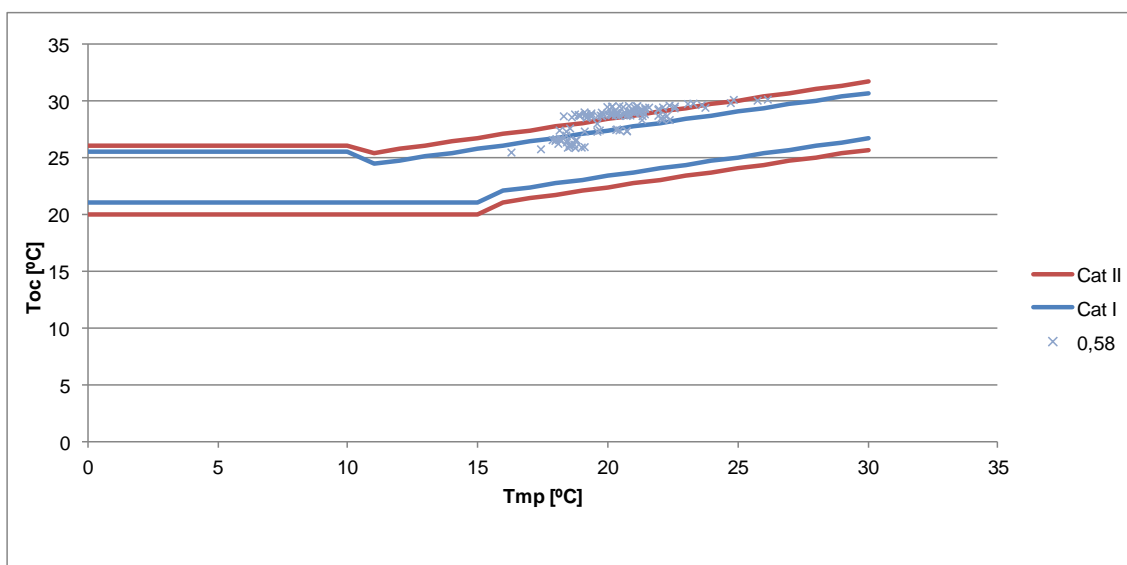


Figura 4.29- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Coimbra- Verão,  $U_m=0,58 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

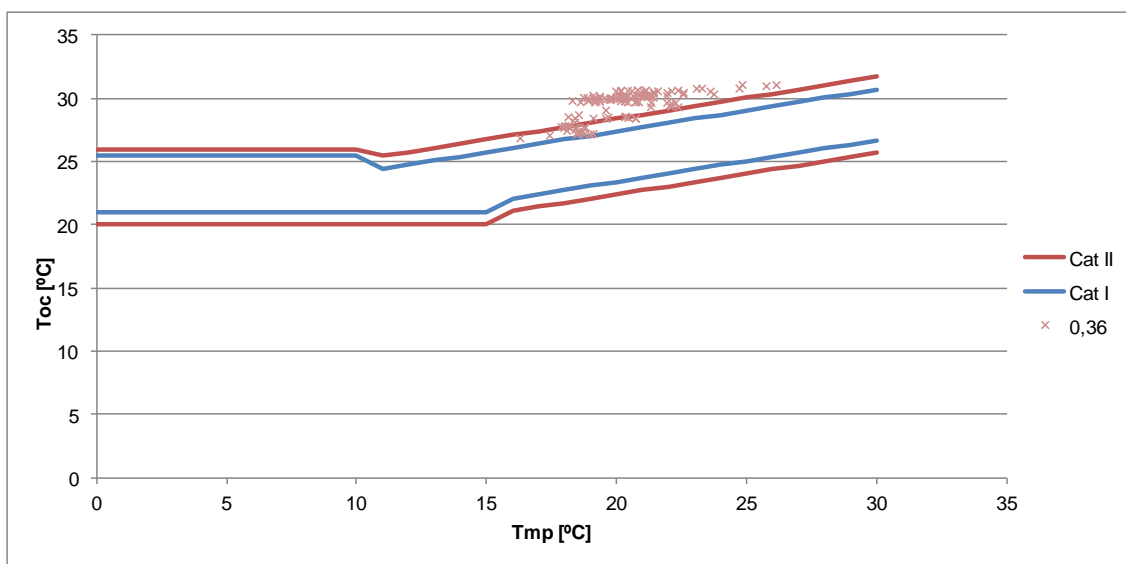


Figura 4.30- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Coimbra- Verão,  $U_m=0,36 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

A zona climática Coimbra, com a diminuição do U da envolvente, aumenta o tempo de desconforto no período de Verão. Referente à solução  $U_m=0,99 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , os valores apresentam um resultado de quase 100% de conforto em toda a estação. É visível que quase a totalidade de resultados está inserida entre a Cat I e Cat II. Como já repetido anteriormente, tornando-se algo de possível conclusão, as soluções correspondentes a  $U_m=0,71 \text{ W/m}^2\text{°C}$  e  $U_m=0,58 \text{ W/m}^2\text{°C}$  apresentam resultados muito semelhantes. Observa-se uma percentagem significativa de valores fora do intervalo de conforto, mas, os resultados aproximam-se muito dos valores limites. Já para  $U_m=0,36 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , é possível dizer que a quase totalidade do tempo da estação é caracterizada por total desconforto dos ocupantes, sendo que as temperaturas apresentam valores elevados em relação ao limite superior de conforto.

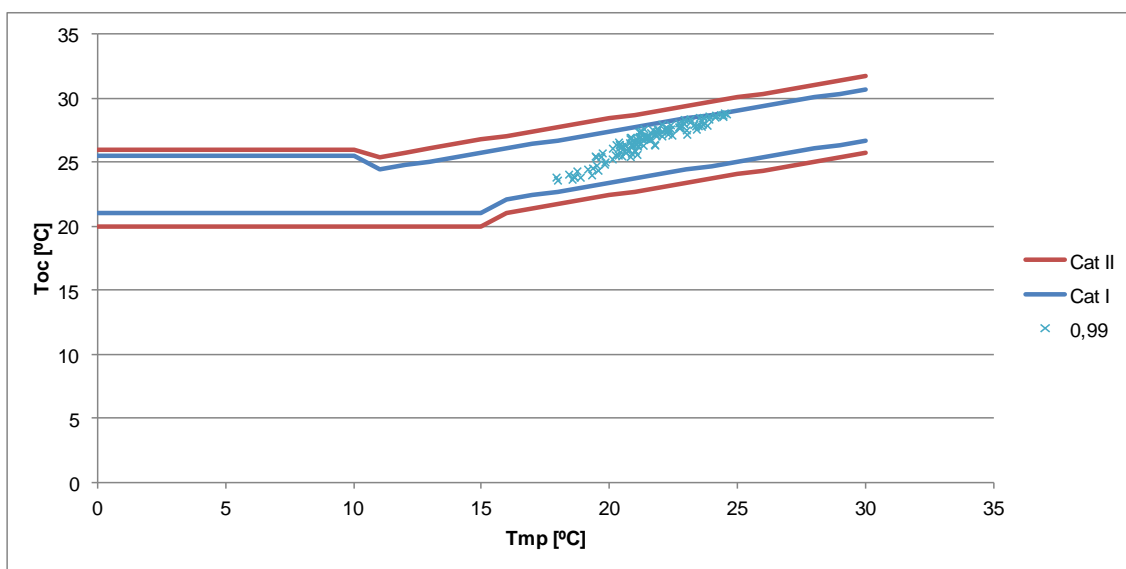


Figura 4.31- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Lisboa- Verão,  $U_m=0,99 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

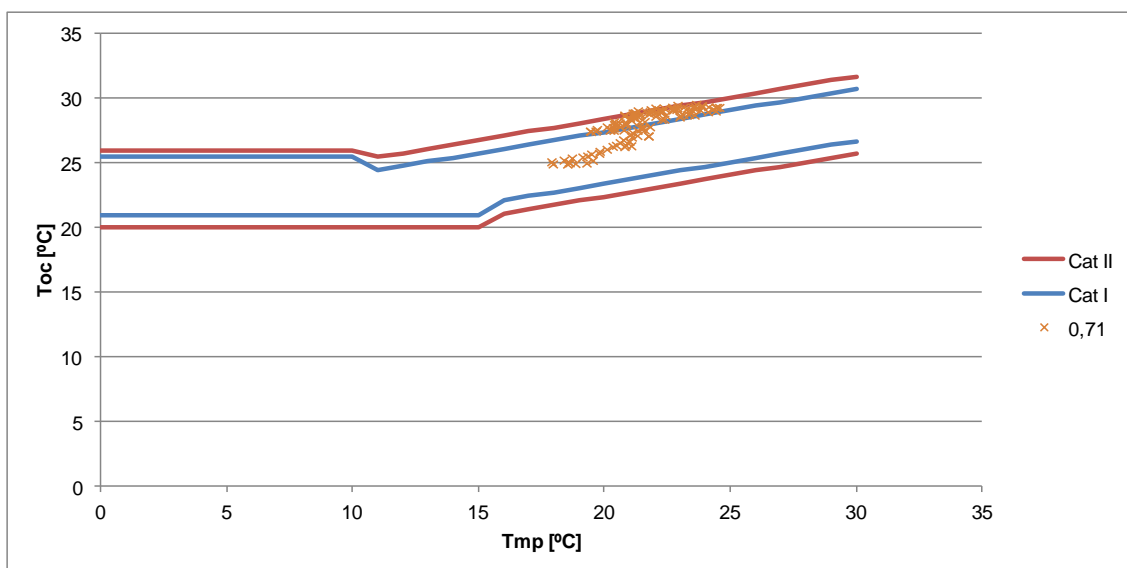


Figura 4.32- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Lisboa- Verão,  $U_m=0,71 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

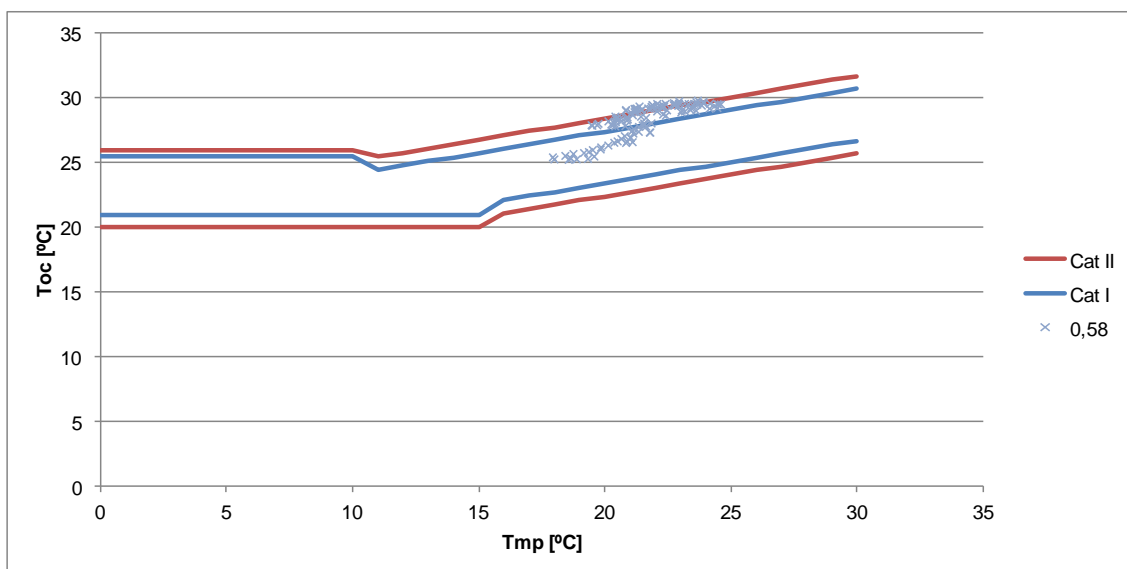


Figura 4.33- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Lisboa- Verão,  $U_m=0,58 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

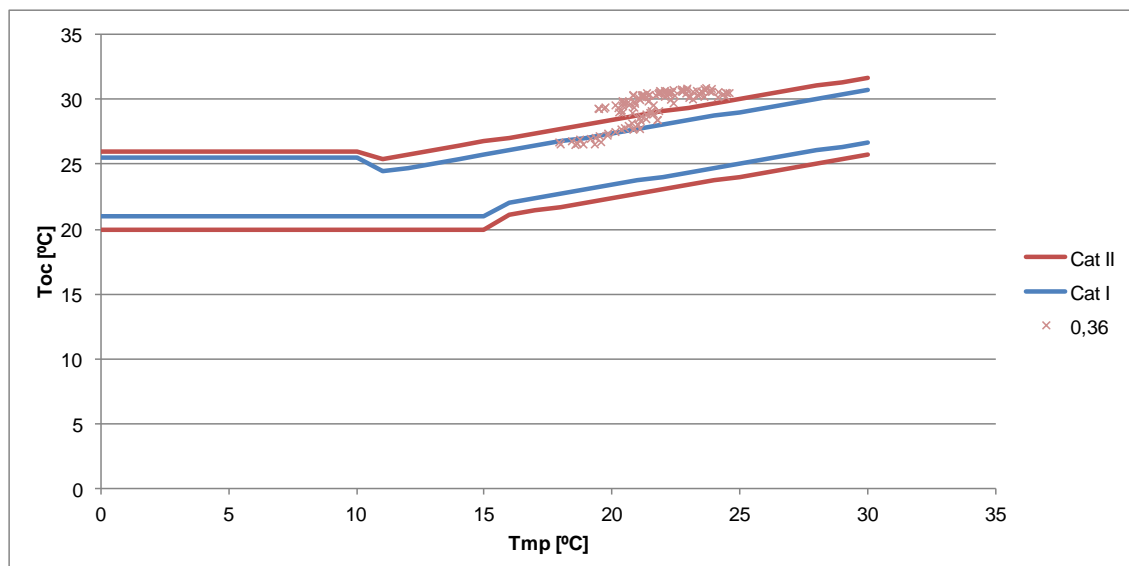


Figura 4.34- Gráfico do modelo adaptativo EN 15251, Lisboa- Verão,  $U_m=0,36 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

Em Lisboa, a evolução regulamentar continua a trazer uma penalização dos resultados favoráveis ao conforto. A solução com  $U_m=0,99 \text{ W/m}^2\text{°C}$  apresenta valores na totalidade da estação dentro do intervalo da Cat I de conforto térmico. À semelhança do  $U_m=0,99 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , a solução com  $U_m=0,71 \text{ W/m}^2\text{°C}$  também apresenta na totalidade da estação valores de conforto; contudo, estes resultados situam-se entre a Cat I e Cat II. Distinto ao que se tem observado até agora, a solução  $U_m=0,58 \text{ W/m}^2\text{°C}$  apresenta valores significativamente diferentes em termos de percentagem de tempo de conforto, em relação à solução  $U_m=0,71 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ; porém, os seus resultados em pouco transcendem os valores limites de conforto. Novamente as soluções caracterizadas por  $U_m=0,36 \text{ W/m}^2\text{°C}$  apresentam valores consideráveis de desconforto, havendo uma diferença significativa entre as temperaturas operativas interiores e as limites.



## 5. Conclusões

A evolução regulamentar trouxe um aumento significativo da resistência térmica dos elementos da envolvente dos edifícios de habitação em Portugal. Através do programa *EnergyPlus* e da folha de cálculo regulamentar, foi possível obter resultados para efetuar um estudo acerca do impacto causado pelas alterações regulamentares com o objetivo de analisar o conforto térmico dos habitantes e o desempenho energético dos edifícios.

Após a análise dos resultados, conclui-se que o incremento de resistência térmica diminuiu os consumos energéticos e aumentou os níveis de conforto térmico na estação de aquecimento. Já no caso da estação de arrefecimento, o aumento da resistência térmica provoca o aumento das necessidades energéticas e uma diminuição do conforto térmico dos habitantes.

Ao contrário do indicado pela folha de cálculo regulamentar, que mostra benefícios associados ao aumento da resistência térmica em ambas as estações, a análise realizada com o programa de simulação dinâmica mostra claras penalizações em termos de comportamento no caso de climas com verões quentes.

Na sequência da avaliação do conforto térmico realizada com dois métodos conclui-se que as soluções construtivas atribuídas aos regulamentos RCCTE 2006 e REH 2013 apresentam o conjunto de valores mais equilibrados em termos de comportamento térmico em ambas as estações.

Contudo, espera-se que no futuro sejam desenvolvidas tecnologias e estratégias “adaptativas” ao contexto climático como forma de responder aos desafios em termos de conforto e desempenho energético consoante a estação.

### Trabalhos Futuros

Através dos resultados obtidos neste estudo, consegue-se prespективar um seguimento da presente dissertação. É possível sugerir os seguintes trabalhos futuros:

- Analisar um conjunto mais alargado de soluções construtivas para um conjunto mais alargado de zonas climáticas e tipologias de edifícios.
- Avaliar o impacto das alterações climáticas no conforto térmico dos habitantes
- Atualizar os valores regulamentares em termos de U como base na avaliação dos níveis de conforto adaptativo.



## 6. Referências bibliográficas

- [1] “Direcção-Geral da Energia e Geologia.” [Online]. Available: <http://www.dgeg.pt>. [Accessed: 16-Jul-2017].
- [2] F. M. A. Henriques (2011), "Comportamento higrotérmico de edifícios", Universidade Nova de Lisboa.
- [3] Decreto-Lei n° 40/90 de 6 de Fevereiro . D.R., vol. 1.<sup>a</sup> série, no. 31. 1990, pp. 490–504.
- [4] EnergyPlus, “Getting Started,” *US Department of Energy*. p. 90, 2016.
- [5] Decreto-Lei n° 80/2006, *Nota Justificativa*. pp. 157–164.
- [6] Directiva 2002/91/CE de 16 Dezembro .C.E., vol. L 1, no. 11. 2003, pp. 65–71.
- [7] Decreto-Lei n.º 78/2006 de 4 de Abril .D.R, vol. 67. 2006, pp. 2–6.
- [8] Decreto-Lei N° 79/2006 de 4 de Abril .D.R, vol. 67. 2006, pp. 2416–2468.
- [9] Decreto-Lei n° 80/2006 de 4 de Abril. D.R, vol. 67. 2006, pp. 2468–2513.
- [10] Directiva 2010/31/UE de 19 de Maio.C.E. 2010, pp. 13–35.
- [11] Decreto-Lei n° 118/2013 de 20 de Agosto .D.R. 2012, pp. 5910–5924.
- [12] Portaria n° 379-A de 22 de Outubro. D.R., no. 2. 2014, pp. 1840–1844.
- [13] Despacho n° 15793 de 3 de dezembro de 2013 .D.R., no. 26. 2013, p. 98.
- [14] Aelenei, D. (2016), REH Light, Manual de apoio à aplicação da regulamentação referente ao comportamento térmico de edifícios de habitação, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.
- [15] “Laboratorio Nacional de Engenharia Civil.” [Online]. Available: [http://www-ext.lnec.pt/LNEC/DE/NESDE/divulgacao/evol\\_tipol.html](http://www-ext.lnec.pt/LNEC/DE/NESDE/divulgacao/evol_tipol.html). [Accessed: 20-May-2017].
- [16] C. P. Santos, “Evolução das soluções de paredes face a novas exigências regulamentares,” in *Paredes de alvenaria*, 2007, pp. 41–64.
- [17] C. O. Cruz, C. M. Silva, P. V. Dias, and I. Teotónio, “Economic impact of changing thermal regulation—An application to the city of Lisbon,” *Energy and Buildings*, vol. 149, Elsevier B.V., pp. 354–367, 2017.
- [18] A. Figueiredo, J. Figueira, R. Vicente, and R. Maio, “Thermal comfort and energy performance: Sensitivity analysis to apply the Passive House concept to the Portuguese climate,” *Building and Environment*, vol. 103. Elsevier Ltd, pp. 276–288, 2016.
- [19] A. Curado, “Conforto Térmico e Eficiência Energética Nos Edifícios De Habitação Social Reabilitados,” 2014.
- [20] F. Ana, “Estudo de Soluções de Otimização para Edifícios de Balanço Energético Nulo,” 2012.
- [21] L. Matias and C. P. Santos, “Conforto térmico adaptativo no setor residencial em Portugal,” Conferencia: 2º CIHEL, 2016, pp. 1–12.
- [22] A. Curado, V. P. De Freitas, and N. M. M. Ramos, “Variability assessment of thermal comfort in a retrofitted social housing neighborhood based on ‘in situ’ measurements,”

*Energy Procedia*, vol. 78, Elsevier B.V., pp. 2790–2795, 2015.

- [23] ANSI/ASHRAE, “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy Standard 55-2013,” *Ashrae*, vol. ASHRAE Sta. p. 58, 2013.
- [24] CEN, “EN 15251:2006 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics,” *Geneva: International Standard Organization*. p. 54, 2007.
- [25] EnergyPlus, “Input Output Reference,” *Bigladder Software*. p. 2109, 2015.
- [26] G. S. Branger and R. J. Dear, “Thermal Adaptation in the Built Environment: a Literature Review,” *Energy and Buildings*, vol. 27, no. 1, pp. 83–96, 1998.
- [27] LNEC, *Avaliação Das Condições De Conforto Térmico Em Edifícios De Habitação*. 2011.
- [28] L. Matias and C. P. Santos, “Critérios para um conforto térmico sustentável nos edifícios em Portugal,” LNEC, 2012, p. 1.
- [29] M. C. Guedes, L. Matias, and C. P. Santos, “Thermal comfort criteria and building design: Field work in Portugal,” *Renewable Energy*, vol. 34, no. 11, pp. 2357–2361, 2009.
- [30] A. Boerstra, “The adaptive thermal comfort criterion in the new EPBD IEQ standard.” p. 7, *BBA Indoor Environmental consultancy*, Netherlands, 2006.
- [31] Portaria nº 349-C/2013 de 2 de Dezembro. D.R., no. 2. 2014, pp. 1840–1844.
- [32] C. A. P. Santos and L. Matias, “Coeficientes De Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios”. LNEC, 2006.
- [33] CEN, “EN ISO 10456: 2007: Building materials and products: Hygrothermal properties. Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values,” *British Standard*, vol. 1. p. 32, 2010.
- [34] Portaria nº 349-B/2013 de 29 de Novembro .D.R., vol. 11, no. 29. 2013, pp. 18–29.
- [35] R. Henninger and M. Witte, “EnergyPlus testing with building thermal envelope and fabric load tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-2007,” *US Department of Energy*. p. 132, 2010.